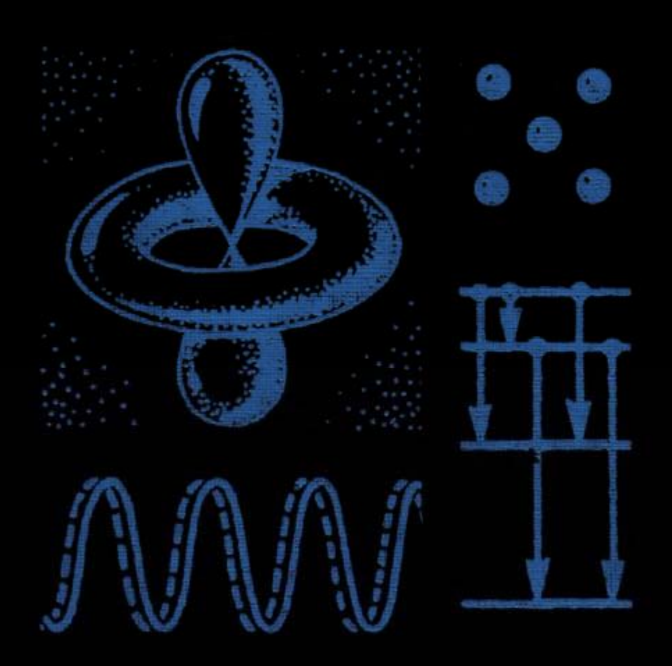
Библиотека учителя физики

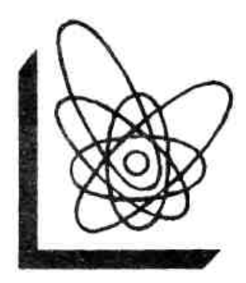


Современная физика в средней школе



Л. В. Тарасов

Современная физика в средней школе



Библиотека учителя физики

Л. В. Тарасов

Современная физика в средней школе

Рекомендовано Главным учебно-методическим управлением
общего среднего образования Госкомитета СССР
по народному образованию

Москва
«Просвещение»
1990

ББК 74.265.1
Т 19

Рецензенты: академик А. А. Абрикосов,
учитель физики школы № 1288 Москвы О. Т. Поглазова

Тарасов Л. В.
Т19. Современная физика в средней школе. — М.: Просвещение, 1990. — 288 с.: ил. — (Б-ка учителя физики) — ISBN 5-09-001317-9.

В книге рассматриваются основные этапы развития физики XX в. и её достижения, анализируется роль современной физики в процессе познания, даются рекомендации по использованию принципов современной физики при изучении курса физики в средней школе.

$\text{Т}\,\frac{4306010000-667}{103(03)-90}$ ПОДПИСНОЕ ББК 74.265.1

ISBN 5-09-001317-9

Предисловие

Современная физика в средней школе... Что скрывается за этими словами? Возможно, кто-то подумает, что речь пойдёт о том, чтобы познакомить учителя средней школы с достижениями современной физики, помочь ему популярно рассказать о них учащимся. Возможно также, кто-то увидит за упомянутыми словами рекомендации, как надо преподносить современную физику в процессе преподавания физики в школе. В действительности же автор ставил перед собой значительно более серьёзную задачу. Данная книга посвящена проблеме перестройки школьной физики, с тем чтобы она, наконец, стала методологически соответствовать современной физике, чтобы современная физика была бы не дополнительной главой (разделом) школьного курса физики, а определяла структуру и методологию всего этого курса. Мы полностью разделяем точку зрения на модернизацию курса физики в средней школе, изложенную в книге «Основы методики преподавания физики в средней школе»: «Модернизация курса физики предусматривает не только включение в него вопросов современной физики, но и изложение вопросов классической физики (в значительной части даже традиционных) по-новому, с применением новых методов исследования и приёмов мышления, а также предполагает усиление классификации, систематизации и обобщения знаний под углом зрения общих идей... Его научный уровень должен соответствовать современному уровню развития науки, и вместе с тем этот курс должен быть доступным для учеников массовой школы по объёму и глубине изложения» [91, с. 77].

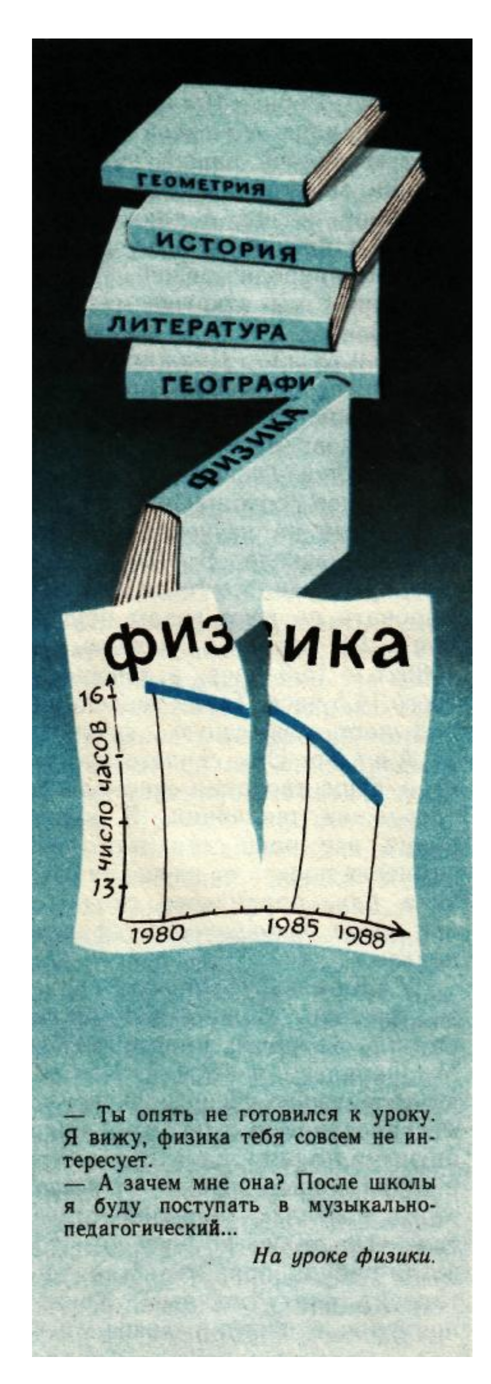
Данная книга состоит из трёх глав (16 параграфов), в которых рассмотрены развитие физики, современная естественнонаучная картина мира, методологические вопросы современной физики. Параграфы перемежаются диалогами между автором и воображаемым читателем — практикующим учителем физики. В этих диалогах предпринята попытка спроецировать рассматриваемые вопросы на школьный курс физики, взглянуть на них с точки зрения процесса обучения физике. Автор выносит на обсуждение методические и методологические вопросы, фокусируя внимание на диалектической сущности современной физики и на необходимости формирования у учащихся диалектического мышления на уроках физики. Рассматриваются многочисленные конкретные примеры, которые могут быть использованы учителем физики в практике преподавания.

Работу автора над книгой стимулировало обсуждение многих поднимаемых здесь проблем с В. Г. Разумовским, В. А. Фабрикантом, И. И. Гуревичем, Б. В. Гнеденко, О. Ф. Кабардиным, Ю. И. Диком, В. А. Орловым, Г. Я. Мякишевым, Г. М. Голиным, Р. Б. Ткачуком, С. Ф. Шиловой, Ю. Б. Зотовым, Л. Ф. Уткиной, Р. И. Барановым, а также со многими учителями физики московских школ. Всем им автор выражает свою искреннюю признательность.

Пока книга писалась и подготавливалась к изданию, рассматриваемые в ней идеи проходили первую апробацию на практике — в ходе педагогического эксперимента по отработке новой модели средней школы «Экология и диалектика». В эксперимент добровольно включилось более 50 школ в разных городах страны, в том числе более двадцати московских школ. Первые результаты практической реализации рассматриваемых в книге идей позволили дополнить её (в последний момент) конкретными соображениями по структуре нового школьного курса физики.

Вступление

Диалог. О некоторых тревожных тенденциях



Учитель. Что происходит сегодня со школьной физикой? Удивительно: живём в эпоху научно-технического прогресса, а *интерес у школьников к физике неуклонно понижается.* Почему?

Автор. Задавали ли Вы этот вопрос самим школьникам?

Учитель. Задавал, конечно. Одни заявляют, что не собираются в дальнейшем заниматься наукой или техникой и поэтому физика им просто не нужна. Другим уроки физики неинтересны, так как то, о чём говорится в классе, им уже известно из журналов, популярных книг, телевизионных передач. Третьи жалуются на трудности усвоения абстрактных понятий, не хотят заучивать формулировки.

Автор. А Ваше мнение? **Учитель.** Школьников можно понять. То, о чём я рассказываю на уроках физики, вряд ли заинтересует будущих экономистов, врачей, работников торговли, сферы обслуживания управления, а уж тем более историков, журналистов, музыкантов, художников. Для большинства из них школьный курс физики неинтересен и непонятен. А для относительно небольшой части учащихся, которые нацелены на науку и технику, этот курс подчас просто малоинформативен, он мало способствует их развитию.

Автор. Может быть, надо специализировать обучение физике? Учить ей применительно к будущей профессии?

Учитель. Такая точка зрения существует, я знаю.

Автор. Следует заметить, что она находит много сторонников в наше время, отличающееся необычайно возросшими перегрузками и широким распространением специализации.

Учитель. Идея дифференцированного обучения может показаться привлекательной. Наверное, в какой-то мере дифференциация нужна, и мы к ней придём. Однако её нельзя рассматривать как панацею от всех бед. Я убеждён, что было бы неправильно взять да поделить всех учащихся на «естественников» и «гуманитариев» и освободить последних от физики и прочих предметов естественно-математического цикла. В общеобразовательной школе физика должна рассматриваться как один из важнейших предметов, выполняющих не только *познавательную*, но также *развивающую* и *воспитывающую* функции. Этот предмет необходим всем — и естественникам, и гуманитариям. Другое дело, что в качестве такого предмета физика должна преподаваться в школе иначе — не так, как она обычно

преподаётся сегодня.

Автор. Совершенно с Вами согласен. Противники общего физического образования подходят к физике как к довольно специальному предмету, обслуживающему, по их мнению, лишь физико-химические, технические и материаловедческие специальности. И надо признать, виноваты в этом в немалой степени сами физики, предпочитающие, как правило, не выходить за рамки собственной научной деятельности. Об этом хорошо сказал известный американский физик И. Раби: «Мы как учёные не справились со своей обязанностью помочь нашей интеллигенции, занятой в других сферах духовной жизни, а также всем людям понять то, что мы делаем, какова природа вещей, какие горизонты мы открываем» [17, с. 323].

Учитель. Должно быть, именно непониманием горизонтов, какие открывает человечеству современная физика, и объясняется последовательное, неуклонное сокращение часов, отводимых на изучение физики в нашей школе. В 1980 г. на физику отводилось (если просуммировать по всем годам обучения) 16 часов в неделю, в 1985 г. — 15,5 часа, а теперь — всего 14,5 часа. Такая тенденция вызывает серьёзную тревогу.

Автор. Она свидетельствует о существовании ещё одной тревожной тенденции. В наше время всё чаще ставится под сомнение польза от изучения физики или, правильнее сказать, всё чаще *недооценивается эта польза.*

Учитель. По поводу пользы физики. Можно вспомнить случай, который произошёл с М. Фарадеем в 1800 г. Как-то в лабораторию учёного, экспериментировавшего с токами и магнитными полями, зашёл министр и задал вопрос: «Какая от всего этого польза?» Фарадей ответил: «Не знаю, но уверен, что когда-нибудь правительство установит плату за это». Таких примеров в истории физики немало. Среди них есть много хорошо известных.

Автор. Думаю, что сегодня одних примеров недостаточно. Необходим обстоятельный разговор о том, как нужно преподавать физику в современной общеобразовательной школе. Нужен серьёзный анализ той пользы, какую приносит обучение молодёжи физике и, в ещё большей степени, той пользы, какую это обучение, поставленное надлежащим образом, могло бы принести.

Учитель. Школу часто упрекают, что она плохо справляется со своей основной задачей — готовить молодёжь к жизни, воспитывать гражданина, формировать гармонически развитую личность. Поэтому вполне понятны призывы усилить гуманитарное образование, роль гуманитарных дисциплин. На фоне этих призывов и происходит постепенное уменьшение часов, отводимых на изучение предметов естественно-математического цикла. Принято считать, что с точки зрения воспитания молодого поколения физика менее полезна, менее эффективна, чем, скажем, литература, история, обществоведение.

Автор. Именно здесь, как мне кажется, и таится главное заблуждение. Разумеется, физика не гуманитарный предмет. Однако в ней содержится мощный «гуманитарный потенциал», имеющий непосредственное отношение к развитию мышления, формированию мировоззрения, воспитанию эстетического чувства, выработке правильной жизненной позиции. Так что с точки зрения воспитания молодёжи физика полезна не менее, чем предметы гуманитарного цикла.

Учитель. Эта мысль представляется мне очень важной!

Автор. Она не нова. В июне 1986 г. в Дубне состоялась встреча физиков и философов по проблеме «Физика в системе культуры» [55]. Участники встречи подчёркивали: сегодня важно учитывать, что физика не только непосредственная производительная сила, но и важнейший источник сведений, позволяющих человеку *ориентироваться в окружающем мире*, в системе культурных ценностей. Эта функция физики не менее важна, чем её вклад в материальные богатства общества. Выступавший на встрече доктор философских наук В. И. Купцов отмечал, что в современном мире весьма затруднён процесс формирования духовных ценностей и поэтому неизмеримо возрастает мировоззренческая роль науки вообще и физики в особенности. Это к вопросу о пользе физики в деле воспитания молодёжи.

Учитель. Но в таком случае надо довольно существенно *перестраивать преподавание физики в школе*. Представляете ли Вы себе, как это следовало бы делать? А если представляете, то как нацелить на такую перестройку огромную армию учителей?

Автор. Вы поставили важные и, конечно, очень сложные вопросы. Размышления над ними, обсуждение их во встречах со многими учителями — всё это и побудило меня написать данную книгу. Давайте же не спеша приступив к её чтению. И первое, с чего следует начать,— это вопрос о роли физики в современном мире.

§1. ФИЗИКА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Говоря о роли физики, выделим три основных момента. Во-первых, физика является для человека важнейшим источником знаний об окружающем мире. Во-вторых, физика, непрерывно расширяя и многократно умножая возможности человека, обеспечивает его уверенное продвижение по пути технического прогресса. В-третьих, физика вносит существенный вклад в развитие духовного облика человека, формирует его мировоззрение, учит ориентироваться в шкале культурных ценностей. Поэтому будем говорить соответственно о *научном, техническом* и *гуманитарном* потенциалах физики.

Эти три потенциала содержались в физике всегда. Но особенно ярко и весомо они проявились в физике XX столетия, что и предопределило ту исключительно важную роль, какую стала играть физика в современном мире.

Физика как важнейший источник знаний об окружающем мире. Как известно, физика исследует наиболее общие свойства и формы движения материи. Она ищет ответы на вопросы: как устроен окружающий мир, каким законам подчиняются происходящие в нём явления и процессы? Стремясь познать «первоначала вещей» и «первопричины явлений», физика в процессе своего развития сформировала сначала механическую картину мира (XVIII — XIX вв.), затем электромагнитную картину (вторая половина XIX — начало XX в.) и, наконец, современную физическую картину мира (середина XX в.).

В начале нашего столетия была создана *теория относительности* — сначала специальная, а затем общая. Её можно рассматривать как великолепное завершение комплекса интенсивно проводившихся в XIX столетии исследований, которые привели к созданию так называемой классической физики. Известный американский физик В. Вайскопф так охарактеризовал теорию относительности: «Это совершенно новый набор концепций, в рамках которых находят объединение механика, электродинамика и гравитация. Они принесли с собой новое восприятие таких понятий, как пространство и время. Эта совокупность идей в каком-то смысле является вершиной и синтезом физики XIX в. Они органически связаны с классическими традициями» [18, с. 730].

Тогда же, в начале века начала создаваться, а к концу первой трети столетия обрела достаточную стройность другая фундаментальная физическая теория XX в.— *квантовая теория.* Если теория относительности эффектно завершала предшествовавший этап развития физики, то квантовая теория, решительно порывая с классической физикой, открывала качественно новый этап в познании человеком материи. «Для квантовой теории характерен именно разрыв с классикой,— писал Вайскопф. — Это шаг в неизведанное, в мир явлений, которые не умещались в рамки идей физики XIX в. Надо было создать новые приёмы мышления, чтобы понять мир атомов и молекул с его дискретными энергетическими состояниями и характерными особенностями спектров и химических связей» [18, с. 730].

Используя квантовую теорию, физики совершили в XX в. в буквальном смысле слова прорыв в понимании вопросов, касающихся поля и вещества, строения и свойств кристаллов, молекул, атомов, атомных ядер, взаимопревращений элементарных частиц. Возникли новые разделы физики, такие, как физика твёрдого тела, физика плазмы, атомная и молекулярная физика, ядерная физика, физика элементарных частиц. А в традиционных разделах, например в оптике, появились совершенно новые главы: квантовая оптика, нелиней-

ная оптика, голография и др.

Физика исследует фундаментальные закономерности явлений; это предопределяет её ведущую роль во всём цикле естественно-математических наук. Ведущая роль физики особенно ярко выявилась именно в XX в. Один из наиболее убедительных примеров — объяснение периодической системы химических элементов на основе квантовомеханических представлений. На стыке физики и других естественных наук возникли новые научные дисциплины. *Химическая физика* исследует электронное строение атомов и молекул, физическую природу химических связей, кинетику химических реакций. *Астрофизика* изучает многообразие физических явлений во Вселенной; она широко применяет методы спектрального анализа и радиоастрономических наблюдений. В отдельные разделы астрофизики выделены: физика Солнца, физика планет, физика межзвёздной среды и туманностей, физика звёзд, космология. *Биофизика* рассматривает физические и физико-химические явления в живых организмах, влияние различных физических факторов на живые системы. В настоящее время из биофизики выделились самостоятельные направления — биоэнергетика, фотобиология, радиобиология. *Геофизика* исследует внутреннее строение Земли, физические процессы, происходящие в её оболочках. Различают физику твёрдой Земли, физику моря и физику атмосферы. Отметим также *агрофизику,* изучающую физические процессы в почве и растениях и разрабатывающую способы регулирования физических условий жизни сельскохозяйственных культур; *петрофизику*, исследующую связь физических свойств горных пород с их структурой и историей формирования; *психофизику*, рассматривающую количественные отношения между силой и характером раздражителя, с одной стороны, и интенсивностью раздражения — с другой.

Физика как основа научно-технического прогресса. Трудно переоценить роль фундаментальных физических исследований в развитии техники. Так, исследования тепловых явлений в XIX в. способствовали быстрому совершенствованию тепловых двигателей. Фундаментальные исследования в области электромагнетизма привели к возникновению и быстрому развитию *электротехники*. В первой половине XIX в. был создан телеграф, в середине века появились электрические осветители, а затем электродвигатели. Во второй половине XIX в. химические источники электрического тока стали вытесняться электрогенераторами. Девятнадцатый век завершился триумфально: появился телефон, родилось радио, был создан автомобиль с бензиновым двигателем, в ряде столиц открылись линии метрополитена, зародилась авиация. В 1912 г. В. Я. Брюсов написал строки, в которых хорошо отразилось победное настроение тех лет:

Свершились все мечты, что были так далёки.
Победный ум прошёл за годы сотни миль.
При электричестве пишу я эти строки,
И у ворот, гудя, стоит автомобиль.

А между тем научно-технический прогресс только ещё набирал темп; научно-техническая революция XX в. ещё только назревала. Открытие электрона, создание и становление квантовой теории, возникновение атомной физики, а затем физики твёрдого тела — всё это предопределило рождение и быстрое развитие *электроники.* Сначала возникла вакуумная электроника (электронные лампы, электронно-лучевые трубки); в 50-х годах стала развиваться полупроводниковая электроника (в 1948 г. был изобретён транзистор); в 60-х годах родилась микроэлектроника. Прогресс в области электроники привёл к созданию весьма совершенных систем радиосвязи, радиоуправления, радиолокации. Развивается телевидение, сменяются одно за другим поколения ЭВМ (растёт их быстродействие, совершенствуется память, расширяются функциональные возможности), появляются промышленные роботы. В 1957 г. состоялся вывод на околоземную орбиту первого искусственного спутника Земли; 1961 г. — полёт Ю. А. Гагарина — первого космонавта планеты; 1969 г.— первые люди на Луне. Нас почти уже не удивляют поразительные успехи космической техники. Мы привыкли к запускам искусственных спутников Земли (их

число давно перевалило за тысячу); становятся всё более привычными полёты космонавтов на пилотируемых космических кораблях, их многодневные вахты на орбитальных станциях. Мы познакомились с обратной стороной Луны, получили фотоснимки поверхности Венеры, Марса, Юпитера, кометы Галлея.

Фундаментальные исследования в области ядерной физики позволили вплотную приступить к решению одной из наиболее острых проблем — энергетической проблемы. Первые ядерные реакторы появились в 40-х годах, а в 1954 г. в СССР начала действовать первая в мире атомная электростанция — родилась *ядерная энергетика.* В настоящее время на Земле работает более трёхсот АЭС; они дают около 20 % всей производимой в мире электрической энергии. Развернуты интенсивные исследования по термоядерному синтезу; прокладываются пути к термоядерной энергетике.

Успехи в исследовании физики газового разряда и физики твёрдого тела, более глубокое понимание физики взаимодействия оптического излучения с веществом, использование принципов и методов радиофизики — всё это предопределило развитие ещё одного важного научно-технического направления — *лазерной техники.* Это направление возникло всего тридцать лет назад (первый лазер создан в 1960 г.), но уже сегодня лазеры находят широкое применение во многих областях практической деятельности человека. Лазерный луч выполняет разнообразные технологические операции (сваривает, режет, пробивает отверстия, закаливает, маркирует и т. д.), используется в качестве хирургического скальпеля, выполняет точнейшие измерения, трудится на строительных площадках и взлётно-посадочных полосах аэродромов, контролирует степень загрязнения атмосферы и океана. В ближайшей перспективе лазерная техника позволит реализовать в широких масштабах оптическую связь и оптическую обработку информации, произвести своеобразную революцию в химии (управление химическими процессами, получение новых веществ и, в частности, особо чистых веществ) и осуществить управляемый термоядерный синтез.

Говоря о связи между развитием физики и научно-техническим прогрессом, следует отметить, что эта связь двусторонняя. С одной стороны, достижения физики лежат в основе развития техники. С другой — повышение уровня техники создаёт условия для интенсификации физических исследований, делает возможным постановку принципиально новых исследований. В качестве примера можно указать на важнейшие исследования, выполняемые на ядерных реакторах или на ускорителях заряженных частиц.

Физика как важнейший компонент человеческой культуры. Воздействуя решающим образом на научно-технический прогресс, физика тем самым оказывает существенное влияние и на все стороны жизни общества, в частности на человеческую культуру. Однако в данном случае мы имеем в виду не это опосредствованное влияние физики на культуру, а влияние *непосредственное*, позволяющее говорить о самой физике как о компоненте культуры. Иными словами, речь идёт о гуманитарном содержании самого предмета физики, которое связано с развитием мышления, формированием мировоззрения, воспитанием чувств. Мы имеем в виду органическую связь физики с развитием общественного сознания, с воспитанием определённого отношения к окружающему миру.

Утверждая *материалистическую диалектику*, физика XX в. открыла ряд исключительно важных истин, значимость которых выходит за рамки самой физики, истин, ставших общечеловеческим достоянием. Во-первых, была доказана *фундаментальность статистических закономерностей* как соответствующих более глубокому этапу (по сравнению с закономерностями динамическими) в процессе познания мира. Было показано, что вероятностная форма причинности является основной, а жёсткая, однозначная причинность есть не более чем частный случай. Физика предоставила нам уникальную возможность: на основе статистических теорий рассмотреть количественно диалектику необходимого и случайного. Выходя за рамки собственных задач, современная физика показала, что *случайность не только путает и нарушает наши планы, но и может нас обогащать, создавая новые возможности.*

Во-вторых, физика XX в. продемонстрировала *всеобщность принципа симметрии*, заставила значительно глубже взглянуть на симметрию, расширив это понятие за рамки геометрических представлений, а главное, рассмотрела диалектику симметрии и асимметрии, связав её с диалектикой общего и различного, сохранения и изменения. Был поставлен вопрос о симметрии-асимметрии физических законов, в связи с чем была выявлена особая роль законов сохранения. Выходя за рамки собственных задач, физика наглядно показала, что *симметрия ограничивает число возможных вариантов структур или вариантов поведения систем*. Это обстоятельство исключительно важно, так как даёт возможность во многих случаях находить решение как результат выявления единственно возможного варианта, без выяснения подробностей (решение из соображений симметрии).

В-третьих, физика XX в. показала, что по мере углубления наших знаний происходит *постепенное стирание граней*, разрушение перегородок. Так, стирается грань между корпускулярным и волновым движениями, между веществом и полем. Оказалось, что как вещество, так и поле состоят из элементарных частиц и, более того, пустота — это вовсе не пустота в обычном понимании, а физический вакуум, «наполненный» виртуальными частицами. Нормой поведения для частиц, рассматриваемых в современной физике, являются взаимопревращения, поэтому мир предстает перед нами как единое целое. В этом мире понятие полностью изолированного объекта по сути дела отсутствует. Здесь уместно напомнить известное ленинское замечание, что в природе нет абсолютных граней, что «все грани в природе условны, относительны, подвижны, выражают приближение нашего ума к познанию материи» [4, с. 298]. В-четвёртых, современная физика подарила нам *принцип соответствия*. Он возник в квантовой механике на этапе её начального развития, но затем превратился в общий методологический принцип, отражающий диалектику процесса познания мира. Он демонстрирует важное положение диалектики: процесс познания — это процесс постепенного и бесконечного приближения к абсолютной истине через последовательность относительных истин. Принцип соответствия показывает, как именно в физике реализуется указанный процесс приближения к истине. Это не механическое добавление новых фактов к уже известным, а процесс последовательного обобщения, когда новое отрицает старое, но отрицает не просто, а с удержанием всего того положительного, что было накоплено в старом. «Изучение физики даёт возможность показать, что все физические представления и теории отражают объективную реальность лишь приближённо, что наши представления о мире непрерывно углубляются и расширяются, что процесс познания материального мира бесконечен» [127, с. 21].

Наши представления о мире... Нет необходимости доказывать, что *современное миропонимание* — важный компонент человеческой культуры. Каждый культурный человек должен хотя бы в общих чертах представлять, как устроен мир, в котором он живёт. Это необходимо не только для общего развития. Любовь к природе предполагает уважение к происходящим в ней процессам, а для этого надо понимать, по каким законам они совершаются. Мы имеем много поучительных примеров, когда природа наказывала нас за наше невежество; пора научиться извлекать из этого уроки. Нельзя также забывать, что именно знание законов природы есть эффективное оружие борьбы с мистическими представлениями, есть фундамент атеистического воспитания.

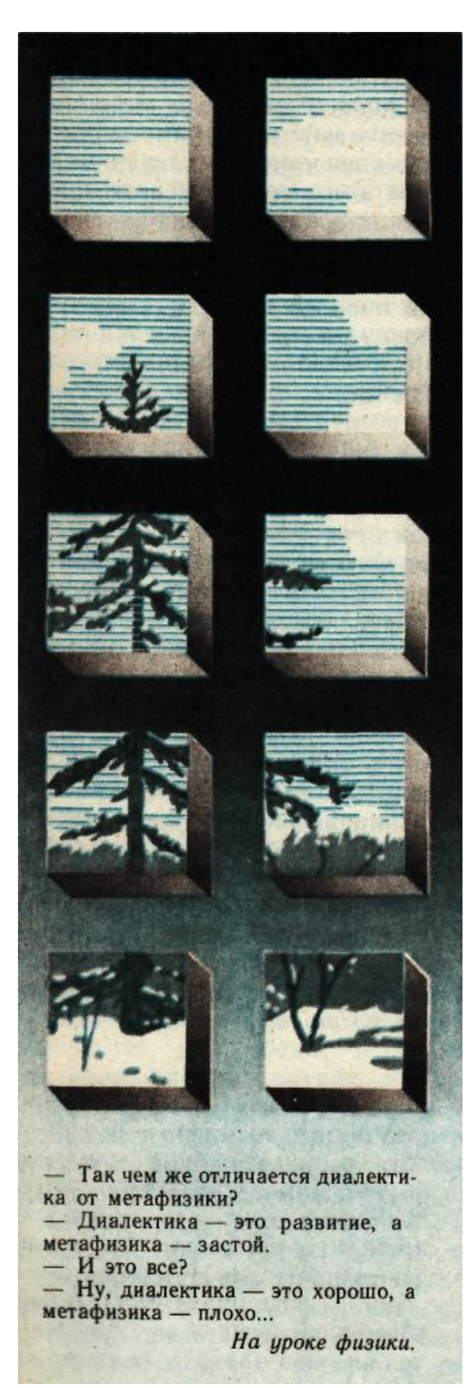
Современная физика вносит существенный вклад в выработку нового стиля мышления, который можно назвать *планетарным мышлением*. Она обращается к проблемам, имеющим большое значение для всех стран и народов. Сюда относятся, например, проблемы солнечно-земных связей, касающиеся воздействия солнечных излучений на магнитосферу, атмосферу и биосферу Земли; прогнозы физической картины мира после ядерной катастрофы, если таковая разразится; глобальные экологические проблемы, связанные с загрязнением Мирового океана и земной атмосферы.

В заключение отметим, что, воздействуя на самый характер мышления, помогая ориентироваться в шкале жизненных ценностей, физика способствует, в конечном счёте, выработке адекватного отношения к окружающему миру и, в частности, активной жизнен-

ной позиции. Любому человеку важно знать, что мир в принципе познаваем, что случайность не всегда вредна, что нужно и можно ориентироваться и работать в мире, насыщенном случайностями, что в этом изменяющемся мире есть тем не менее «опорные точки», инварианты (что бы ни менялось, а энергия сохраняется), что по мере углубления знаний картина неизбежно усложняется, становится диалектичнее, так что вчерашние «перегородки» более не годятся.

Мы убеждаемся, таким образом, что современная физика действительно содержит в себе мощный гуманитарный потенциал. Можно не считать слишком большим преувеличением слова американского физика И. Раби: «Физика составляет сердцевину гуманитарного образования нашего времени» [37, с. 22].

Диалог. О диалектике и метафизике



Автор. Приходилось ли Вам на уроках физики говорить школьникам о *диалектике* и *метафизике*?

Учитель. Нет, не приходилось. Школьников знакомят с этими понятиями на уроках обществоведения.

Автор. А как же быть с требованием формировать диалектико-материалистическое мировоззрение при обучении физике?

Учитель. Честно говоря, на практике это требование не выполняется. По крайней мере, в большинстве школ. Кстати говоря, в школьном учебнике физики слово «диалектика» вообще не употребляется.

Автор. В 1908 г. в своей знаменитой книге «Материализм и эмпириокритицизм» В. И. Ленин писал: «Современная физика лежит в родах. Она рожает диалектический материализм» [4, с. 332]. Проанализированная В. И. Лениным новейшая революция в естествознании как раз и означала резкий поворот в физике от материализма *метафизического* к материализму *диалектическому*. Именно диалектичностью физика XX в. коренным образом отличается от физики XIX в. К сожалению, это принципиальное обстоятельство пока ещё не нашло отражения в школьном курсе физики и уже по одной только этой причине существующий школьный курс физики не может рассматриваться как *современный*.

Учитель. Но в нынешних школьных учебниках приведено много понятий и фактов, которые физике XIX в. были неизвестны. Эта физика не имела дела с электронами, атомными ядрами, элементарными частицами; она не рассматривала электрическую проводимость полупроводников, устройство электронно-лучевой трубки, принцип работы лазера или ядерного реактора. Разве всё это — не современная физика?

Автор. Вы подняли очень важный вопрос. Дело в том, что можно соответствовать

«букве» и не соответствовать «духу» современной физики. «Дух» современной физики — *диалектика* (диалектика единства и многообразия, диалектика необходимого и случайного, диалектика симметрии и асимметрии и т. д.). Но диалектики как раз и нет в школьном курсе физики. Есть «буква», но нет «духа». И как следствие, нет формирования диалектического мировоззрения.

Учитель. Тут я с Вами совершенно согласен. Думаю даже, что без «духа» вряд ли возможно сколь-либо глубоко понять «букву». Нетрудно приучить школьников широко применять термины «электрон» или «атом». Однако это еще не означает, что они понимают специфику данных понятий, разбираются в особенностях поведения микрообъектов, чувствуют радикальное отличие этих объектов от тех объектов, которые встречаются в обыденной практике.

Автор. Данная книга названа «Современная физика в средней школе». Для большей ясности здесь надо было бы дать два подзаголовка: «Использование диалектики при изучении физики в школе» и «Обучение школьников диалектике в процессе изучения физики». Два подзаголовка отражают два диалектически взаимосвязанных обстоятельства. С одной стороны, именно через диалектику школьник может приобщиться к современной физике. С другой — именно в процессе изучения физики он может научиться диалектике.

Учитель. Получается, что перед нами ещё один учебник по диалектике?

Автор. В известном смысле. Поэтому давайте начнём с основного вопроса: в чём различие между диалектикой и метафизикой?

Учитель. Метафизика рассматривает всё разрозненно и в неподвижности, а диалектика — во взаимосвязи и в развитии.

Автор. Возражений нет, но не хотелось бы ограничиться столь общими фразами. Предлагаю начать разговор о диалектике и метафизике немного издалека — со следующих строк известного русского поэта Ф. И. Тютчева:

Как сердцу высказать себя?
Другому как понять тебя?
Поймёт ли он, чем ты живёшь?
Мысль изречённая есть ложь...

Итак, подчеркнём: «Мысль изречённая есть ложь». Конечно, поэт не имел в виду ложь как обычное враньё. Просто он хотел сказать, что попытка сформулировать мысль, как правило, искажает сущность мысли. В итоге высказанная мысль может содержать в себе в какой-то мере правду, а в какой-то мере ложь. Нечто подобное мы видим и в следующих строках нашей поэтессы Б. А. Ахмадулиной:

Пришла и говорю: как нынешнему снегу
Легко лететь с небес в угоду февралю,
Так мне в угоду вам легко взойти на сцену.
Не верьте мне, когда я это говорю.

Опять — так, да не так!

Учитель. У поэтов это можно встретить довольно часто.

Автор. Думаю, что дело не в специфике поэтического восприятия мира. Здесь уместно вспомнить слова В. И. Ленина: «Мы не можем представить, выразить, смерить, изобразить движения, не прервав непрерывного, не упростив, угрубив, не разделив, не омертвив живого. Изображение движения мыслью есть всегда огрубление, омертвление, — и не только мыслью, но и ощущением, и не только движения, но и **всякого** понятия. И в этом *суть* диалектики...» [5, с. 233]. Тютчевскую фразу «Мысль изречённая есть ложь» надо понимать именно под углом ленинских слов о неизбежности огрубления, омертвления действительности мыслью.

Учитель. Рассматривая тютчевскую фразу с этих позиций, придётся признать, что в ней отражена сущность диалектики.

Автор. Фактически так оно и есть. Теперь попробуем понять, в чём же заключается

главное различие между диалектикой и метафизикой. Метафизика — это *мышление крайними категориями*; ей свойственна категоричность, присущая формальной логике. *Либо да, либо нет — третьего не дано*. Либо правильно, либо неправильно. Либо враг, либо друг. Либо можно, либо нельзя. Только две краски, никаких полутонов. Человек, рассуждающий метафизически, получив некий результат, ставит вопрос: верен этот результат или не верен? Существенно, что он признаёт только два ответа: да или нет. Если «да», то результат принимается, если же «нет», то попросту отбрасывается. Метафизик признаёт истину только в готовом, окончательном виде и не терпит изменений в том, что уже принято.

Учитель. А что плохого в формуле «либо да, либо нет — третьего не дано»? Она предполагает ясность и чёткость мышления.

Автор. Она предполагает категоричность мышления. И, если хотите, известную примитивность мышления. Потому что более адекватна действительности формула диалектики: *в какой-то мере да, а в какой-то мере нет.* В какой-то мере верно, а в какой-то мере не верно. В какой-то мере можно, а в какой-то мере нельзя. Здесь очень важно суметь *оценить меру* — меру дозволенности, меру верности полученного результата, меру правды, содержащейся в «изречённой мысли», меру нашего огрубления действительности. Ясно, что нет алгоритмов для определения меры; её оценка есть своего рода искусство, которому нас учат *практика, действительность*.

Учитель. Для молодёжи характерна категоричность мышления.

Автор. Это естественно — ведь у неё нет достаточного жизненного опыта. Жизнь ещё не успела обучить её диалектике. Это ведь с годами усваиваются «диалектические истины» типа «чем дальше в лес, тем больше дров», «тише едешь — дальше будешь», «чем хуже, тем лучше», «так, да не так», «нет правил без исключений» и т. д. Когда мы встречаемся в жизни с бюрократом, мы на себе испытываем примитивность метафизического мышления. Бюрократ посмотрит в инструкцию и категорически заявит — это можно, а это нельзя. Для него это — окончательная истина. А жизнь часто предлагает ситуации, не учтённые инструкциями; к оценке подобных ситуаций бюрократ неспособен. Диалектика же предполагает иной подход: никакие инструкции, очевидно, не могут отразить многообразия реальной жизни, поэтому выполнять инструкции следует не безоговорочно, а с учётом ситуации, в той мере, в какой этого требует ситуация, интересы дела. Вспомним народную мудрость: «Нет правил без исключений».

Учитель. Метафизически мыслить, конечно, проще. Диалектика требует оценки меры.

Автор. Совершенно верно. Важно отметить, что мы всегда тяготеем к метафизическому мышлению. Тем самым мы стремимся удовлетворить потребность в ясности и чёткости — когда всё расставлено по своим местам, разложено по «полочкам». Однако действительность, практика, сама жизнь заставляют нас отказываться от заманчивой чёткости и погружаться в диалектику противоречий, в мир без чётких граней, где всё верно лишь относительно, лишь в какой-то мере, лишь с учётом конкретной ситуации и конкретного момента.

Учитель. Я согласен с Вами. Однако в процессе обучения важны ясность и чёткость. Вряд ли целесообразно «погружать в диалектику противоречий» неискушённый ум, привыкший мыслить категорически. Следовательно, мы, педагоги, не можем отказаться от метафизических подходов.

Автор. Никто этого не требует. Да это и невозможно. Учащимся действительно нужны разграничения, «полочки», «перегородки». Однако крайне важно, чтобы всё это не абсолютизировалось (а именно так мы, к сожалению, поступаем довольно часто). Надо всё время помнить, что ясность относительна, разграничения условны и подвижны. Поэтому в процессе обучения принципиально важно идти вглубь, постепенно уточняя, выходя за установленные ранее «перегородки», преодолевая устаревшие представления, перестраиваясь в самом глубоком понимании этого слова.

Учитель. Насколько я понял, нужно диалектически сочетать метафизику и диалектику.

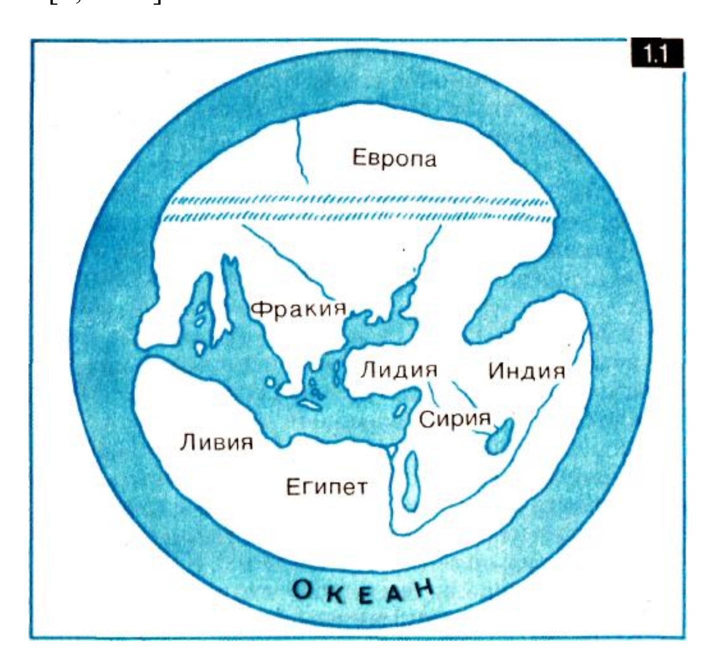
Автор. Именно это я и имел в виду.

Глава первая

ДОЛГИЙ ПУТЬ К СОВРЕМЕННОЙ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНОЙ КАРТИНЕ МИРА

§ 2. ПЕРВЫЕ ШАГИ

Зарождение науки в античную эпоху. Наука о природе зародилась в лоне древнегреческой философии две с половиной тысячи лет назад. В Древней Греции впервые в истории начали заниматься наукой не только ради решения практических задач, но и просто потому, что это интересно. Возникли профессии учёного и учителя. Первые учёные стали называться философами, что в переводе с греческого означает «любители мудрости». Конечно, античная наука располагала крайне скудными данными, в те времена экспериментальные исследования практически не проводились. В арсенале древнегреческих философов были лишь простые наблюдения над природой, гипотезы и логические рассуждения. Неудивительно, что их выводы нередко оказывались неверными, многое в их научном наследии представляется нам сегодня наивным. И тем не менее, как отмечал Ф. Энгельс в «Диалектике природы», «в многообразных формах греческой философии уже имеются в зародыше, в процессе возникновения, почти все позднейшие типы мировоззрений. Поэтому и теоретическое естествознание, если оно хочет проследить историю возникновения и развития своих теперешних общих положений, вынуждено возвращаться к грекам» [2, с. 369]. Этот экскурс в античную эпоху важен, в частности, и потому, что здесь мы обнаруживаем удивительное владение диалектическим методом. «Древнегреческие философы, — писал Энгельс, — были все прирожденными, стихийными диалектиками, и Аристотель, самая универсальная голова среди них, уже исследовал существеннейшие формы диалектического мышления» [2, с. 19].



Итак, перенесёмся мысленно в Древнюю Грецию, скажем, в VII в. до н. э. Как тогда представлялся людям мир? Поверхность Земли они уподобляли плоскому диску, который по краям омывается водами Океана (рис. 1.1). Этот диск как бы накрыт сверху твёрдой небесной полусферой, а под диском находится подземный мир, состоящий из двух этажей

(верхний этаж — Аид, царство мёртвых, нижний — Тартар, тёмная бездна, где носятся вихри). Пройдёт двести лет, и этот примитивный взгляд на устройство мира уступит (сначала временно) догадке о шарообразной Земле, движущейся в космосе по круговой орбите. Но об этом чуть позже.



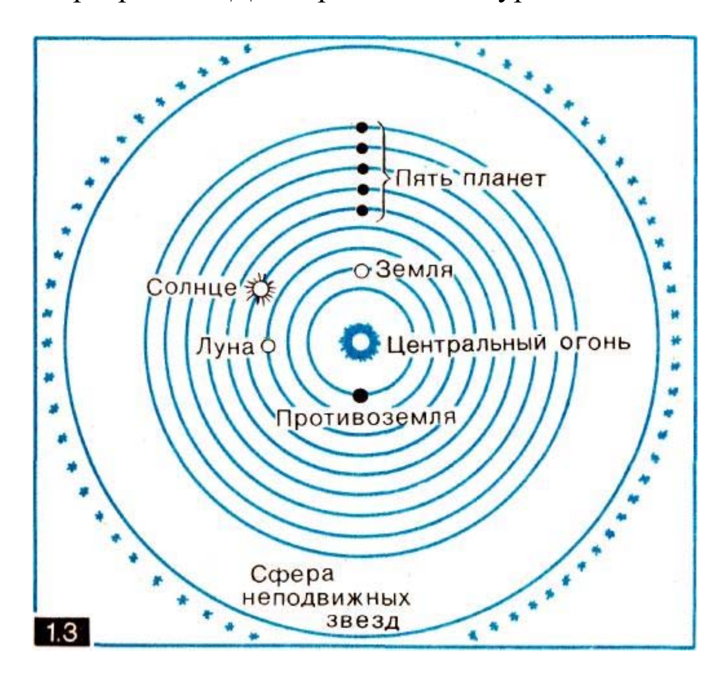
В VI в. до н. э. в античной науке укрепилась идея о материальной первооснове всех вещей. Фалес Милетский полагал, что такой первоосновой является вода; а Анаксимен — воздух. Анаксимандр предположил, что есть беспредельное и неопределённое начало («апейрон»), которое «всем управляет». Особенно хотелось бы выделить Гераклита Эфесского (540 – 480 гг. до н. э.), рассматривавшего в качестве первоосновы всего огонь. Он утверждал: «Мир, единый из всего, не создан никем из богов и никем из людей, а был, есть и будет вечно живым огнём, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим» [59, с. 14]. В учении Гераклита важную роль играла идея вечного движения, всеобщей изменчивости вещей. Всё течет — все изменяется. Нельзя войти дважды в одну и ту же реку — на входящего во второй раз будут набегать уже новые воды. Гераклит фактически достиг понимания единства и. борьбы противоположностей; он считал, что противоположности, противоборствуя, в то же время не исключают друг друга, но образуют вместе гармонию мира, Гегель видел в этом исторически первое выражение диалектического миропонимания. А Энгельс писал: «...первоначальный, наивный, но по сути дела правильный взгляд на мир был присущ древнегреческой философии и впервые ясно выражен Гераклитом: всё существует и в то же время не существует, так как всё *течет,* всё постоянно изменяется, всё находится в постоянном процессе возникновения и исчезновения» [2, с. 20].

Три научных программы античности [24, 107]. Речь идёт о *математической программе*, связываемой с именами Пифагора и Платона, и двух физических (физико-философских) программах — *континуалистской программе Анаксагора — Аристотеля* (от лат. continuum — непрерывное) и *атомистической программе Демокрита — Эпикура.*

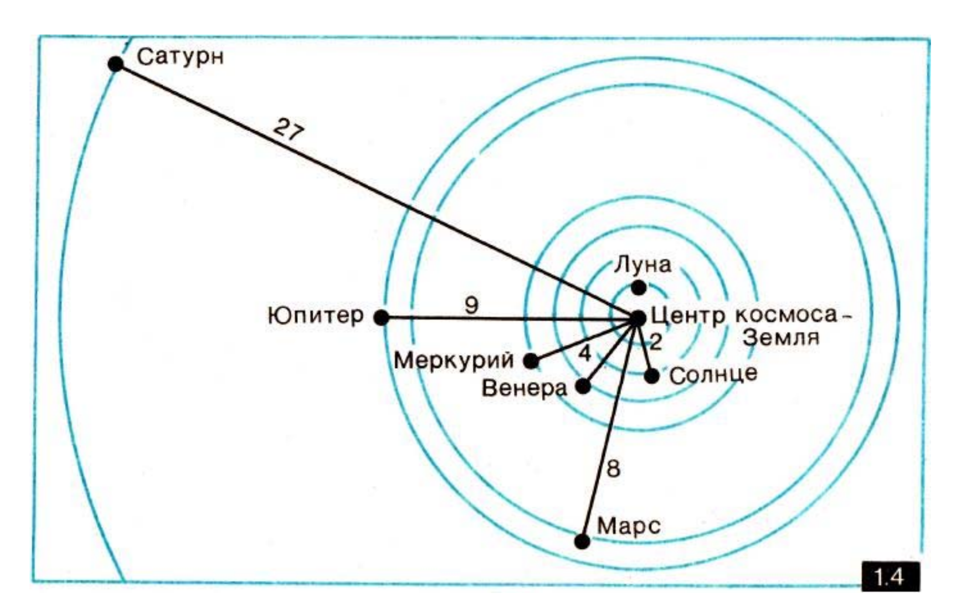
С философской точки зрения математическая программа Пифагора — Платона являлась идеалистической, тогда как обе физические программы были по сути своей материалистическими. Пифагорейцы верили в божественную роль чисел, которые якобы управляют миром. «Всё есть число», — утверждал Пифагор (VI в. до н. э.). Это означало, что в каждой вещи неким образом «скрыты» определённые числа, определённые отношения чисел. Мистика чисел, пронизывавшая всё учение пифагорейцев, оказалась весьма живучей — она проникла в религиозные воззрения последующих столетий, проявилась в магии и астрологии. В то же время надо признать, что подчёркивание важности числовых соотношений в природе способствовало развитию методов количественного анализа, утверждало необходимость применения математики в научном описании природы.

Платон (428 – 347 гг. до н. э.) считал, что истинным «бытиём» является мир идей, постигаемый человеком в процессе размышлений благодаря знаниям, которые изначально «скрыты» в его душе. Что же касается предметов окружающего мира, воспринимаемых органами чувств, то они являются, по Платону, всего лишь тенями, отражениями соответствующих идей. Это была позиция объективного идеализма. Платон полагал, что основу мира вещей составляют четыре «стихии»: огонь, воздух, вода, земля. Они состоят из мельчайших частичек, имеющих форму правильных многогранников. Частицы огня —

тетраэдры, воздуха — *октаэдры,* воды — *икосаэдры,* земли — *кубы.* Позднее Платон добавил к четырём стихиям эфир, частицы которого, как он полагал, имеют форму *додекаэдра* (на рис. 1.2 показаны все пять правильных многогранников, их часто называют платоновыми телами). Мельчайшие частички в виде правильных многогранников могут рассматриваться как атомы; таким образом, математическая программа Платона пересекается с атомистической программой Демокрита — Эпикура.



Следует отметить, что последователи Пифагора уделяли большое внимание космогоническим вопросам: все они считали, что Земля имеет форму шара. Они выдвинули так называемую *пироцентрическую* систему мира, в которой Земля и различные небесные тела, включая Солнце, движутся по сферам вокруг некоего «центрального огня». На рисунке 1.3 представлена система мира, предложенная пифагорейцем Филолаем (V в. до н. э.). Вокруг центрального огня располагаются десять сфер — сфера невидимой людям Противоземли, затем сферы Земли, Луны, Солнца, пяти планет и, наконец, сфера неподвижных звёзд.



Под пятью планетами надо понимать Меркурий, Венеру, Марс, Юпитер, Сатурн. Таинственную Противоземлю ввели в систему лишь для того, чтобы общее число сфер было равно десяти — священному числу пифагорейцев. Пироцентрическая система Филолая вско-

ре уступила место *геоцентрической* системе Платона (геоцентрическая система, обычно связываемая с именем Птолемея, просуществовала вплоть до XVI в.). Система мира по Платону (рис. 1.4) по сравнению с системой Филолая представляет собой шаг назад. Любопытно, что в III в. до н. э. Аристарх Самосский проявил удивительную прозорливость, предложив *гелиоцентрическую* систему мира, т. е. поместив в центр всех сфер Солнце. Однако в те времена эта исключительно смелая идея не получила признания и была предана забвению (есть основания считать, что Коперник не был знаком с нею).

Переходя к обсуждению физических программ античной науки, отметим их наиболее важные черты. Континуалистская программа отрицала пустоту (вакуум) в природе, рассматривала материальный мир в виде непрерывно заполняющей всё его пространство субстанции, в которой совершаются круговые и иные движения, Предполагалось, что эта материальная субстанция беспредельно делима. Атомистическая программа, напротив, не признавала беспредельную делимость материи: она исходила из предположения, что материя состоит из очень маленьких, невидимых глазу неделимых частичек — *атомов* (по-гречески «атом» — неделимый, точнее, нерассекаемый). Атомисты полагали, что мир — это, в конечном счете, пустота, в которой движутся атомы или скопления атомов.

Континуалистская физическая программа Анаксагора — Аристотеля. Наверное, невозможно указать достаточно определённо, когда именно зародилась физика. Обычно рождение физики связывают с именем Аристотеля (384 – 322 гг. до н. э.). Думается, однако, что следует перенестись ещё на сто лет назад — в то время, когда жил и трудился Анаксагор (500 – 428 гг. до н. э.). «Он был первым мыслителем, попытавшимся сформулировать — пусть в весьма общей и неопределённой форме — физические закономерности, лежащие в основе наблюдаемых явлений. Он был первым учёным, который начал ставить эксперименты, разумеется, ещё очень грубые и несовершенные, для проверки своих утверждений. Таким образом, Анаксагора можно по праву назвать родоначальником физической науки» [106, с. 335].

Анаксагор считал, что пустоты нет и что всё пространство Космоса непрерывно заполнено материей. Он говорил о «существующих вещах», которые не возникают и не уничтожаются, а существуют вечно и образуют в разных соединениях все объекты нашего мира. В каждом объекте, как бы мал он ни был, содержатся все «вещи»: «всё во всем», «во всём есть часть всего». Материя находится во вращательном (вихревом) движении; мир есть вращающийся Космос. Это круговращение началось когда-то в некоторой малой области пространства под действием некоего первичного толчка (движущего начала, так называемого «нуса»), а затем стало разрастаться, захватывая новые и новые области пространства, и одновременно замедляться. Анаксагор утверждал, что указанное круговращение проявляется в суточном вращении небесного свода. Земля, как относительно тяжёлое, массивное тело, замедлялась быстрее, и теперь она неподвижно пребывает в центре вращающегося вокруг неё и при этом расширяющегося Космоса. Анаксагор был уверен, что развитие Космоса во времени происходит строго необходимо. Как и все участники континуалистской программы, он полностью исключал случайность из картины мира.

Своё завершение континуалистская программа получила сто лет спустя в трудах Аристотеля — одного из наиболее выдающихся умов античной эпохи. По Аристотелю, Космос ограничен, имеет форму сферы, в центре которой находится земной шар; за пределами сферы нет ничего — ни пространства, ни времени. В пределах же сферы нет пустоты — всё заполняет «первичная материя» Под действием той или иной пары из четырёх «первичных сил» (горячего, сухого, холодного, мокрого) первичная материя приобретает вид одной из четырёх «стихий» (огня, воздуха, воды, земли). Так от сочетания сухого и горячего получается огонь, сухого и холодного — земля, мокрого и холодного — вода, мокрого и горячего — воздух. «Стихии» могут переходить одна в другую и, кроме того вступать в различные соединения друг с другом, образуя разнообразные «вещества»: металлы, песок, глину, мясо, кровь, древесину и т. д. Наконец, из веществ образуются всевозможные тела.

Аристотель различает *естественные* и *насильственные* движения тел. Для земных тел естественными являются движения по прямой к центру Космоса (т. е. вниз) или от центра Космоса (вверх); тяжёлые тела по самой своей природе *стремятся* вниз, а лёгкие *стремятся* вверх. Всякие иные движения земных тел являются насильственными. Для небесных светил естественными движениями являются движения по кругам вокруг центра Космоса, т. е. вокруг Земли Причину естественных движений Аристотель усматривает в самой природе этих движений; причина насильственных движений — сила, действующая на тело. При этом инерция во внимание не принималась (понимания инерции тогда ещё не было); поэтому насильственное движение считалось возможным, лишь пока действует сила Если действие силы прекратится, движение должно тотчас тоже прекратиться. Прямолинейное равномерное скольжение льдышки по ровной горизонтальной поверхности льда является, по Аристотелю, насильственным движением и требует непрекращающегося внешнего воздействия. Почему летит выпущенная из лука стрела? Так как природа не терпит пустоты, рассуждал Аристотель, то в пространство позади стрелы немедленно устремляется воздух; он-то и подталкивает всё время стрелу, заставляя её перемещаться вперёд.

Представления Аристотеля о естественных и насильственных движениях тел господствовали в науке в течение многих столетий — вплоть до XVII в., когда возникла механика Галилея — Ньютона. В дальнейшем от этих представлений отказались. Правда, некоторые их отголоски дожили до наших дней; и сегодня встречаются подчас выражения типа «тело стремится прийти в состояние с минимальной энергией», «электроны стремятся перейти на наиболее низкий уровень». Это таинственное «стремление» неодушевлённых объектов напоминает аристотелевское «стремление» тел совершать естественные перемещения.

Следует отметить, что именно Аристотель ввёл термин «физика», что в переводе означает «учение о природе». Он сформулировал основную задачу науки — поиск начал и причин. «То, что мы ищем, — это начала и причины существующего, — писал Аристотель. — Учение о природе имеет дело... с такой сущностью, которая имеет начало движения и покоя в самой себе. Это учение не о деятельности и не о творчестве» [7, с. 180]. Тем самым Аристотель подчёркивал отличие физики («учения о природе») от политики («учения о деятельности») и поэтики («учения о творчестве»). В своих трудах Аристотель весьма часто задаёт вопрос «почему?»; он считает, что именно на этот вопрос и должно давать ответы научное знание. «... Ни одно из чувственных восприятий мы не считаем мудростью, хотя они и дают важнейшие знания о единичном, но они ни относительно чего не указывают «почему», например, почему огонь горяч, а указывают лишь, что он горяч» [7, с. 67]. «Каждое «почему» сводится в конечном счёте к определению вещи, а первое «почему» и есть причина и начало» [7, с. 70]. В отличие от Анаксагора Аристотель не обращается к эксперименту, он полагает, что физика, подобно математике, есть наука теоретическая («умозрительная»), основанная на наблюдениях и логических рассуждениях.

Атомистическая физическая программа Демокрита — Эпикура. Основателями атомистики в Древней Греции считаются Левкипп и его знаменитый ученик Демокрит (около 460 – 370 гг. до н. э.). Согласно Левкиппу и Демокриту, в мире есть лишь два «начала» — пустота (небытие) и атомы (бытие). Пустота безгранична, в ней нет ни «верха», ни «низа», нет в ней и какого-либо «центра». В этом бесконечном пространстве в различных направлениях беспорядочно носятся атомы. Атомы бесконечно разнообразны по форме, они имеют выпуклости, углубления и даже крючкообразные зацепки; это позволяет им при столкновениях сцепляться и образовывать различные тела. За внешней беспорядочностью движений атомов скрывается необходимость. Ничто не совершается случайно, но «всё совершается по закону и в силу необходимости». Демокрит и его последователи не отрицали случайность; однако они рассматривали её как понятие субъективное, прикрывающее человеческое незнание. Демокрит утверждал: «Люди сотворили себе кумир из случая как прикрытие для присущего им недомыслия» [69, с. 216].

Интересно, как в рамках атомистической гипотезы трактовались ощущения. От каждого тела, утверждал Демокрит, исходят во все стороны истечения («образы тела») — тончайшие слои из атомов; они отделяются от поверхности тела и с огромной скоростью распространяются по пространству. Когда эти «образы» попадают в те или иные органы чувств (в глаза, на язык, в нос), то воздействуют на подобные им атомы, находящиеся в теле человека, и это действие передаётся затем «атомам души». Таким образом, все ощущения и восприятия — результат взаимодействия атомов «образов тела» с атомами органов чувств и «атомами души». Например, ощущение белого цвета вызывают в нашем глазу гладкие атомы, а ощущение чёрного цвета — шероховатые. Те же гладкие атомы, попав на язык, вызывают ощущение сладкого, а попав в нос — ощущение благовония. В атомистическом мире Демокрита нашлось место и богам. Боги у него вполне материальны — они состоят из особых соединений атомов, которые недоступны нашим органам чувств. Лишь иногда боги посылают спящим людям свои «образы»; люди воспринимают их во сне. Зачем понадобились материалисту Демокриту боги? Ведь, по Демокриту, движение атомов вечно и не нуждается в каком-либо высшем начале. По-видимому, богам отводилась роль некоего верховного разума, определявшего для всего «закон и необходимость».

В послеаристотелевский период атомистическое учение получило развитие у Эпикура (341 – 270 гг. до н. э.). Его учение отличается большей конкретностью и, можно смело утверждать, большей физичностью. Почему сохнет бельё? Потому что под действием солнечного тепла и ветра от него отрываются невидимые глазу атомы воды. Почему та рука медной статуи у городских ворот, к которой прикасаются губы входящих в город, тоньше другой руки? Потому что припадающие к статуе люди уносят на губах атомы меди. Почему стёрты каменные ступени храма? Потому что люди уносят на своих подошвах атомы камня. Мы видим, что все явления природы Эпикур стремился объяснить на основе атомистических представлений — как изменения сочетаний различных атомов.

Различались ли представления этих выдающихся учёных античной эпохи, принадлежавших к одной и той же атомистической научной школе? Различие между натурфилософией Демокрита и натурфилософией Эпикура было связано главным образом с пониманием природы случайного. Демокрит, как уже отмечалось, считал, что случайность субъективна, связана с нашим незнанием. Эпикур же, не отрицая *субъективной* случайности, выдвинул предположение о существовании также *объективной* случайности — случайности, лежащей в основе самой природы вещей, самой природы движения атомов. Он предположил возможность *самопроизвольных* (не внешне, а внутренне обусловленных) отклонений движущихся атомов, ввёл специальный термин «спонтанные отклонения». Маркс в своей докторской диссертации, называвшейся «Различие между натурфилософией Демокрита и натурфилософией Эпикура», отмечал глубокое философское значение этого допущения, сделанного Эпикуром. В современных исследованиях науки античной эпохи можно найти такую характеристику учения Эпикура: «В учении Эпикура о спонтанном отклонении в наивной форме была выражена догадка древнего грека о внутреннем источнике движения материи, была сделана первоначальная, стихийно-диалектическая попытка преодолеть фаталистическую тенденцию детерминизма Демокрита и, исходя из основ его атомистического материализма, усовершенствовав его, нанести решающий удар идеализму и теологии платоников» [46, с. 33].

Атомистическая физическая программа древних греков поистине удивительна; мы, люди XX столетия, находим в ней предвидение многих сторон современной научной картины мира. Однако в те давние времена эта пророческая программа не получила признания и на долгие столетия была вытеснена континуалистской программой Аристотеля. Атомистика стала возрождаться лишь во второй половине XVII в. (Гюйгенс, Бойль и др.); она получила мощный импульс к развитию в XIX в. (благодаря основополагающим трудам Максвелла и Больцмана) и окончательно восторжествовала (разумеется, на качественно новом уровне) в нашем веке.

Поэма Лукреция «О природе вещей». Прекрасным памятником античной науке

явилась поэма Лукреция «О природе вещей», написанная примерно в 50 г. до н. э. Поэма посвящена Эпикуру, поэтому большое внимание уделяется в ней атомистическому учению. В то же время здесь даётся критический анализ других учений и рассматриваются самые разные стороны действительности. Остановимся на этом великолепном произведении античной эпохи более подробно, используя перевод Ф. А. Петровского [68].

Прежде всего отметим *материалистический* дух поэмы, понимание того, что основой страха перед «божьим веленьем» является незнание, неумение разобраться в причинах явлений:

За основание тут мы берём положенье такое:
Из ничего не творится ничто по божественной воле.
И оттого только страх всех смертных объемлет, что много
Видят явлений они на земле и на небе нередко,
Коих причины никак усмотреть и понять не умеют,
И полагают, что всё это божьим веленьем творится.

Лукреций отвергает учения, предлагавшие в качестве первоосновы огонь (Гераклит), воздух (Анаксимен), воду (Фалес), а также более поздние учения, согласно которым имеются четыре основных «стихии»: огонь, воздух, вода, земля (Платон, Аристотель):

... Те, кто считал, что все вещи возникли
Лишь из огня, и огонь полагали основою мира,
Так же, как те, кто почёл за основу всего мирозданья
Воздух, равно как и те, кто думал, что влага способна
Вещи сама созидать, или мнил, что земля образует
Всё, превращаясь сама в природу вещей всевозможных,
Кажется мне, далеко от истины в сторону сбились.
К этим прибавь ещё тех, кто начала вещей удвояет,
С воздухом вместе огонь сочетая иль воду с землёю,
Иль за основу всего принимает четыре стихии,
Именно: землю, огонь, дыхание воздуха, влагу.

Мы находим здесь аргументированную критику учения Анаксагора о наличии в каждой вещи мельчайших «семян» всех вещей:

Анаксагора теперь мы рассмотрим «гомеомер*ию*»...
Он разумеет под ней, что из крошечных и из мельчайших
Кости родятся костей, что из крошечных и из мельчайших
Мышцы рождаются мышц, и что кровь образуется в теле
Из сочетанья в одно сходящихся вместе кровинок.
... Так как пища растит и питает нам тело,
Выйдет, что надо считать, будто всякая твёрдая пища
Так же, как жидкость, сама состоит из вещей чужеродных:
Из сухожилий, костей, и гноя, и крови в смешеньи...
Если таятся в дровах и пламя, и дым вместе с пеплом,
Из чужеродных вещей и дрова состоят несомненно...
Правдоподобия нет никакого в таком объясненьи,
Ибо тогда и зерно, дробимое камнем тяжёлым,
Крови следы оставлять должно бы на нём постоянно
Или ещё что-нибудь, что в нашем питаемом теле.

Достаточно подробно изложено в поэме учение атомистов. Попробуем выделить основные положения этого учения, расположив их в той последовательности, какая кажется нам целесообразной. В первую очередь отметим смелое по тем временам утверждение о безграничности Вселенной (напомним, что такой авторитет, как Аристотель, рассматривал ограниченный Космос с чётко выделенным центром):

Нет никакого конца ни с какой стороны у Вселенной...
Центра ведь нет нигде у Вселенной, раз ей никакого
Нету конца...

Мир — это *атомы, движущиеся в пустоте*:

Всю, самоё по себе, составляют природу две вещи:
Это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство,
Где пребывают они и где двигаться могут различно.

Лукреций поясняет, что под «телами» он подразумевает здесь «первоначала вещей», «вещей семена». Иначе говоря, это *атомы*. Они просты, плотны, неделимы — и в этом залог сохранения материального мира. Именно поэтому мир существует веками, не обращаясь, так сказать, в прах:

... Существуют такие тела, что прочны и вечны.
Это — вещей семена и Начала в учении нашем,
То, из чего получился весь мир, существующий ныне...
Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны.
Иначе ведь не могли бы они, сохраняясь веками,
От бесконечных времён и досель восстанавливать вещи.

Лукреций весьма тонко аргументирует идею *дискретности* материи: если бы материя была непрерывна, то любая её малая часть могла бы играть роль Вселенной для частей, которые существенно меньше — и не было бы качественного различия между «наименьшей вещью» и «Вселенной». Фактически мы встречаемся здесь с утверждением, что природа неинвариантна относительно преобразований подобия и что эта неинвариантность непосредственно связана с дискретностью материи, т. е. с атомистикой. Можно утверждать также, что здесь мы встречаемся с мыслью, подразумевающей необходимость перехода количественных изменений в качественные. Всё это выражено до удивления ясно:

Если не будет затем ничего наименьшего, будет
Из бесконечных частей состоять и мельчайшее тело:
У половины всегда найдётся своя половина
И для деленья нигде не окажется вовсе предела.
Чем отличишь ты тогда наименьшую вещь от Вселенной?
Ровно, поверь мне, ничем. Потому что, хотя никакого
Нет у Вселенной конца, но ведь даже мельчайшие вещи
Из бесконечных частей состоять одинаково будут.

Напомним, что атомисты стремились объяснить все явления и все объекты, исходя из различных сочетаний атомов:

Часто имеет большое значенье, с какими
И в положеньи каком войдут в сочетание те же
Первоначала и как они двигаться будут взаимно...
Первоначала вещей, разумеется, вовсе не вольно
Все остроумно в таком разместилися стройном порядке
И о движеньях своих не условились раньше, конечно,
Но многократно свои положения в мире меняя,
От бесконечных времён постоянным толчкам подвергаясь,
Всякие виды пройдя сочетаний и разных движений,
В расположенья они, наконец, попадают, из коих
Вся совокупность вещей получилась в теперешнем виде.

Чтобы дать представление о *случайных движениях* атомов (о спонтанных отклонениях), Лукреций использует картину пылинок, которые мечутся в солнечном луче. Описав

эту картину, он затем замечает:

Можешь из этого ты уяснить себе, что неустанно
Первоначала вещей в пустоте необъятной мятутся...
Кроме того, потому обратить тебе надо вниманье
На суматоху в телах, мелькающих в солнечном свете,
Что из неё познаёшь ты материи также движенья,
Происходящие в ней потаённо и скрытно от взора.

Разве это не предвидение картины *теплового движения* атомов и молекул в веществе?

Конечно, не все рассуждения автора поэмы одинаково удачны. Встречаются наивные утверждения, ложность которых для нас очевидна. Так, Лукреций, объясняя происхождение грома, называет несколько причин и всякий раз ошибается:

... Когда через облако дует
Ветер, разносится шум...
В тучах бывают ещё и волны, которые будто
Рокот глухой издают, разбиваясь...
Часто гремят, наконец, и рушатся с грохотом громким
Льдины и град, высоко в облаках сокрушаясь огромных,
Ибо, коль ветер сожмёт и стеснит их, ломаются горы
Сдавленных туч снеговых, перемешанных с градом холодным.

Это вообще очень характерно для древнегреческой науки — искать не одну, а *несколько* возможных причин того или иного явления. Как правило, древние греки не были ортодоксами; их диалектически настроенный ум допускал *разные альтернативы*:

Будто нельзя допустить, что возможно и то, и другое,
Иль что учение то нисколько не хуже, чем это.

Перебирая разные варианты, древние греки, случалось, натыкались и на правильный вариант (хотя, надо признать, не всегда это осознавали). В качестве примера приведём рассуждения Лукреция о причинах изменения фаз Луны:

Может Луна блестеть, ударяема Солнца лучами,
День ото дня свой лик обращая всё больше и больше
К нашему взору, по мере того как отходит от Солнца
До полнолунья, когда напротив него засверкает...
Но допустимо и то, что, собственный свет излучая,
Катится в небе Луна и даёт изменения блеска,
Ибо возможно, что с ней вращается тело другое,
Что заступает ей путь, постоянно от нас заслоняя.

Может вращаться Луна и как шар или, если угодно,
Мяч, — в половине одной облитый сияющим блеском,
При обращеньи своём являя различные фазы,
Вплоть до того, как она откроется нашему взору
Той стороной, где вся сверкает пламенем ярким,
Мало-помалу затем обращаясь вспять и скрывая
Всю светоносную часть своего шаровидного тела.

Здесь выдвинуты три предположения. Второе и третье предположения (светящаяся собственным светом Луна, периодически закрываемая от нас другим небесным телом, и вращающийся вокруг собственной оси лунный шар, у которого светится лишь одна половина) являются ошибочными. Первое же предположение можно признать вполне правильным: Луна светится отражённым от Солнца светом, и её фазы зависят от взаимного расположения небесных тел. Мы говорим «вполне», так как следует помнить, что Лукре-

ций исходил из геоцентрической системы мира; он считал, что и Луна, и Солнце движутся вокруг Земли. Заметим, что сам Лукреций не делает выбора из рассмотренных трёх вариантов («учение то нисколько не хуже, чем это»).

Не будем, однако, слишком придирчивыми — мы должны помнить о том, когда писалась эта удивительная книга. Гораздо интереснее те мысли Лукреция, которые предвосхитили грядущие открытия. Мы имеем в виду не только атомистические представления о веществе. Отталкиваясь от демокритовой теории «образов» и следуя Эпикуру, Лукреций говорит о корпускулярной природе света и правильно объясняет зрение:

... От вещей всевозможных, какие мы видим,
Необходимо должны истекать и лететь, рассыпаясь,
Тельца, которые бьют по глазам, вызывая в них зренье.

Он понимает относительность движения:

Кажется нам, что корабль, на котором плывём мы, недвижен,
Тот же, который стоит причаленный, мимо проходит;
Кажется, будто к корме убегают холмы и долины,
Мимо которых идёт наш корабль, паруса распустивши.

Наблюдая, как более тяжёлые тела, падая, обгоняют более лёгкие, Лукреций совершенно справедливо объясняет это тем, что

...Воздуха тонкая сущность
Не в состоянья вещам одинаковых ставить препятствий,
Но уступает скорее имеющим большую тяжесть.

И верно заключает отсюда, что в пустоте все тела должны падать одинаково:

Должно поэтому всё, проносясь в пустоте без препятствий,
Равную скорость иметь, несмотря на различие в весе.

Нельзя не подивиться такому заключению. Ведь оно сделано за шестнадцать столетий до Галилея!

Поэма «О природе вещей» интересна для нас и в другом отношении. Её автор пишет не только о естественнонаучных вопросах. Он рассматривает эти вопросы в органической связи с общественно-гуманитарными вопросами, вопросами морали. Лукреций с философских позиций касается вопроса жизни и смерти, подчёркивает важность познания мира, пишет о том, что не богатства и не власть, а знания в сочетании со здоровьем представляют собой истинные ценности. Перед нами «природа вещей», которую надо понимать интегрированно — с самой общей точки зрения. Расставаясь с этой удивительной поэмой — подлинным гимном человеческой мудрости, прислушаемся к великолепным сентенциям, дошедшим до нас через двадцать столетий:

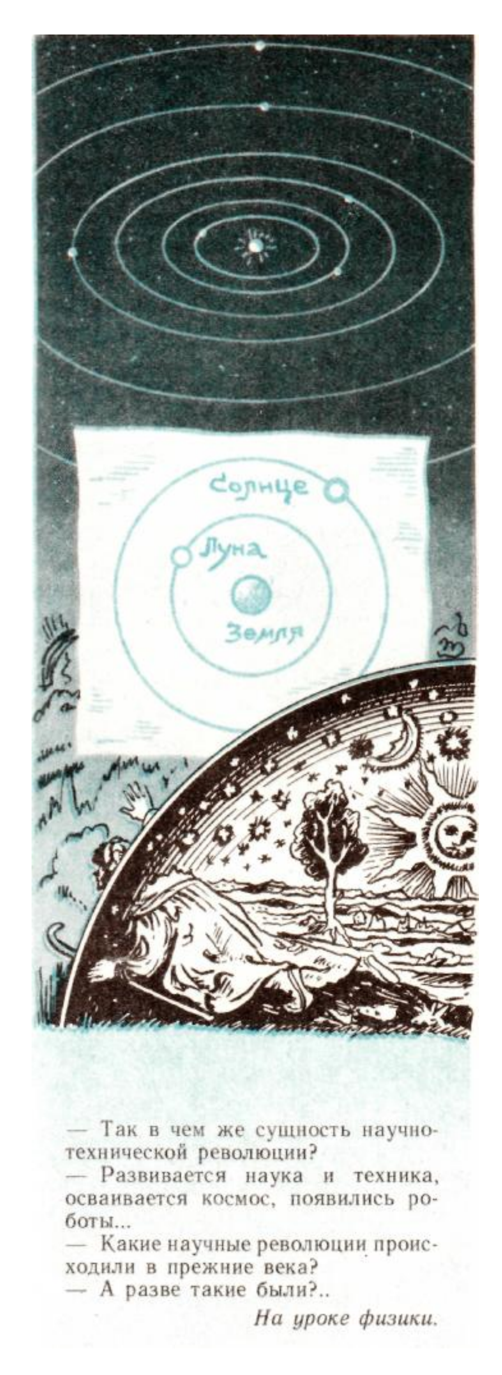
В собственность жизнь никому не даётся, а только на время.

Но безмятежная жизнь невозможна без чистого сердца.

Если же сердце не чисто у нас, то какие боренья,
Сколько опасностей нам угрожают тогда поневоле,
Сколько жестоких забот и терзаний, внушаемых страстью,
Мучат смятенных людей и какие вселяют тревоги!

Тот же, кто в жизни себе кормилом взял истинный разум,
Тот обладает всегда богатством умеренной жизни;
Дух безмятежен его, и живёт он, довольствуясь малым.

Диалог. О научных революциях



— Так в чем же сущность научно-технической революции?
— Развивается наука и техника, осваивается космос, появились роботы...
— Какие научные революции происходили в прежние века?
— А разве такие были?..

На уроке физики.

Автор. Обращаетесь ли Вы в процессе преподавания к *научным революциям*?

Учитель. Конечно. Изучение физики мы завершаем темой «Физика и научно-техническая революция».

Автор. На рубеже XIX и XX вв. произошла научная революция, которую В. И. Ленин назвал «новейшей революцией в естествознании». Совершались научные революции и в прежние времена. Рассказываете ли Вы школьникам об этих революциях?

Учитель. Не рассказываю. Это не предусмотрено программой. О них в учебниках физики даже не упоминается.

Автор. Но ведь важно, чтобы школьники воспринимали физику как науку, находящуюся в *постоянном развитии*, а не как нечто сформированное, неизменное.

Учитель. Думаю, что они это вполне понимают. Законы динамики они связывают с именем Ньютона, а тот жил во второй половине XVII — первой половине XVIII в. Они знают, что молекулярные представления во времена Ньютона практически отсутствовали; эти представления разрабатывались главным образом в XIX в. В этом же веке создано единое учение об электрических и магнитных явлениях. Они знают, что только в XX в. появились теория относительности и квантовая физика. Многие физические законы, правила, модели, постоянные носят имена учёных, которые их установили, исследовали. Уже отсюда видно, что физика «строилась» постепенно, на протяжении многих столетий. Всякий понимает, что закон Архимеда был установлен в III в. до н. э., а, например, модель атома водорода по Бору появилась уже в нашем столетии.

Автор. Это верно. Но не возникает ли у школьников представление о развитии физики как о спокойном *эволюционном* процессе, сводящемся к *постепенному накоплению новых фактов*?

Учитель. Возможно, так оно и есть.

Автор. Получается такая картина: сменяются века, рождаются новые учёные, они делают какие-то открытия, эти открытия подготавливают почву для последующих открытий, которые делают последующие поколения учёных. В результате идёт накопление фактов, растёт число физических законов, в физике появляются новые главы, учебники становятся всё толще и толще. Создается впечатление, что «новая» физика — это «старая» физика плюс некоторые новые главы.

Учитель. Но ведь в определённом смысле так и есть. Школьник XIX столетия изучал законы Ньютона. Школьник XX столетия изучает те же законы Ньютона плюс ещё нечто,

о чём школьник XIX столетия и догадываться не мог. Разве не так?

Автор. Так, да не так. Процесс развития науки по самой своей сути диалектичен. Он не сводится к накоплению фактов. Накопление фактов неизбежно приводит к очередному *революционному скачку*.

Учитель. С революционными скачками школьники знакомятся на уроках истории и обществоведения. Смысл скачков вполне понятен, когда речь идёт о социальных революциях. А в чём сущность скачков, связываемых с научными революциями? Так ли уж важно знакомить с ними школьников? Надо ли усложнять для них картину развития науки?

Автор. Речь идёт вовсе не об усложнении картины развития, а как раз о разъяснении её. В картине развития как простого накопления фактов нет *внутренних противоречий*, а следовательно, нет *диалектики*. Для развития необходимо преодоление (разрешение) противоречий. Именно они — движущая сила развития. Это азбука диалектики. Исключая из рассмотрения противоречия, мы не упрощаем картину развития — мы её фактически разрушаем, искажаем настолько, что она утрачивает самую сущность.

Учитель. Но что же представляют собой противоречия? Между чем именно противоречия?

Автор. Между системой накопленных к данному времени *фактов* и принятой для этого времени *парадигмой*.

Учитель. Что такое парадигма?

Автор. Парадигма — это общепринятая концепция, система взглядов, которую общество считает основополагающей. По-моему, педагоги-естественники обычно не обращают внимания: на парадигму; они предпочитают говорить только о фактах. Часто можно слышать, что главное — это фактические данные, что физика — наука экспериментальная.

Учитель. Но физика действительно наука экспериментальная.

Автор. Сегодня приоритет экспериментальных фактов уже не принимается столь безоговорочно. Достигнуто понимание того, что важны не столько *сами* факты, сколько их *осмысление*. А последнее в существеннейшей мере зависит от господствующей в данное время парадигмы.

В целом картина развития науки выглядит так. На каждом этапе формируется определённая парадигма, находящаяся в соответствии с известными фактами. Факты, продолжая накопляться, неизбежно вступают в противоречие с существующей парадигмой, назревает революционная ситуация. Эта ситуация приводит, в конечном счете, к качественному изменению парадигмы: прежние стереотипы отвергаются, формируется новая система взглядов. «Рушатся старые представления и понятия, ломается сам метод мышления учёных, коренным образом изменяется их взгляд на мир, на природу» [53, с. 54]. Такова сущность научной революции. Можно сказать, что это всегда *определённый скачок в мышлении.*

Учитель. Итак, научная революция — это смена парадигм. А какова при этом судьба прежней парадигмы? Можно ли считать, что она отправляется «на свалку»?

Автор. Нет, конечно. Нельзя полагать, будто развитие есть простое накопление фактов, не затрагивающее парадигму, но точно так же нельзя считать, что развитие — это цепочка своеобразных «катастроф», когда очередная парадигма попросту отбрасывается, а на её место ставится другая. Это крайности, а истина пребывает где-то посредине. Рождающаяся в результате научной революции новая парадигма органически включает в себя всё то ценное, что содержалось в прежней парадигме.

Учитель. Понимаю — Вы имеете в виду *принцип соответствия*.

Автор. Совершенно верно. Но подробнее об этом важном методологическом принципе, отражающем диалектику процесса познания, мне хотелось бы поговорить позднее.

Учитель. О каких конкретно научных революциях следовало бы, по-вашему, рассказывать школьникам?

Автор. Прежде всего о революции XVI в., связываемой с именем Н. Коперника, опровергнувшего учение Птолемея и выдвинувшего гелиоцентрическую систему мира. Теория

Коперника требовала, естественно, физического обоснования. Каковы физические причины движения планет и движения вообще? Революционные идеи Коперника стимулировали возникновение научных программ Галилея, Декарта, Ньютона, Лейбница, заложивших основы экспериментального и математического естествознания.

Учитель. Здесь всё понятно. Предложенная Коперником гелиоцентрическая система мира разрушила господствовавшую концепцию, согласно которой Земля являлась центром Вселенной.

Автор. Дело не только в этом. Человек начал понимать, что не всегда следует принимать непосредственную видимость за истину. Оказалось, что всеми наблюдаемое перемещение Солнца по небосводу вовсе не означает, что Солнце движется вокруг Земли. «Коперник, а вслед за ним целая плеяда великих учёных показали, что за внешней кажимостью (видимостью) вещей и явлений, за их наружной оболочкой, непосредственно нами видимой, скрывается невидимая нами, неощутимая непосредственно нашими органами чувств их сущность, уловить и обнаружить которую можно лишь с помощью абстрактного, отвлечённого мышления. Это и означало, что насущной задачей эпохи стала необходимость перейти от прежнего живого созерцания к абстрактному мышлению» [53, с. 57].

Учитель. Наверное, правильнее говорить не о том, что Коперник совершил научную революцию, а о том, что он положил начало революции, которая продолжалась довольно длительное время.

Автор. Вы правы. В отличие от социальных научные революции, как правило, не датируются годами. Они датируются десятилетиями и даже ещё более длительными промежутками времени. Тем не менее для удобства мы и в этих случаях часто указываем определённые годы, например годы выхода в свет того или иного основополагающего научного труда, внёсшего решающий, фундаментальный вклад в научную революцию. Так, мы упоминаем 1543 г. — когда была издана книга Н. Коперника «Обращение небесных сфер» (она вышла в год смерти автора). Упоминаем мы и 1830 г.— когда вышел в свет первый том главного труда Ч. Лайеля «Основы геологии».

Учитель. С именем Лайеля тоже связана научная революция?

Автор. Если Коперник разрушил представление о Земле как центре мироздания, то Лайель сделал следующий шаг — разрушил представление о божественном происхождении Земли. По Лайелю, история Земли не следствие божественной воли, а естественный процесс, происходящий в соответствии с законами природы. Можно считать, что именно представления Лайеля предопределили, в конечном счёте, создание современной теории тектоники плит.

Учитель. Но ведь всё это выходит за рамки физики.

Автор. А разве научное знание в своём развитии обязано «считаться» с междисциплинарными перегородками? Астроном Коперник взорвал парадигму о Земле как центре Вселенной, геолог Лайель взорвал парадигму о божественном происхождении Земли, биолог Дарвин взорвал парадигму о божественном происхождении человека.

Учитель. Дарвин — это ещё одна научная революция?

Автор. Конечно. Труды Ч. Дарвина «Происхождение видов путём естественного отбора» (1859) и «Происхождение человека и половой отбор» (1871) разрушили, по сути дела, последнюю крепость сверхъестественного. «Его теория показала, что все организмы, включая наш вид, обязаны своим существованием естественным процессам, как, согласно теории Лайеля, и образование долин рек, землетрясения или наводнения» [109, с. 41].

Учитель. Как я понимаю, цепочка научных революций была связана фактически с переосмыслением места человека во Вселенной.

Автор. Это переосмысление продолжилось в наше время — в XX в. была осознана необходимость отказа от концепции «стороннего наблюдателя». Человек всегда мысленно ставил себя над природой, он всегда изучал её как бы со стороны, извне, для удобства расчленяя её в своём сознании на части и исследуя эти части по отдельности. Сегодня подобная позиция неприемлема. Пришло понимание того, что человек — участник всего

процесса эволюции природы, испытывающий на себе влияние космоса, различных природных процессов. Новая парадигма предполагает переход от изучения природы «по частям» к изучению её в *едином комплексе*, причём этот комплекс должен включать в себя и самого человека.

Учитель. С какими именами связывают эту научную революцию?

Автор. Наверное, надо выделить два имени. В начале XX в. А. Л. Чижевский обратил внимание, на влияние циклов активности Солнца на многие процессы в земной биосфере и, в частности, на здоровье людей. Согласно идеям Чижевского, человека надо рассматривать как «часть природы» и, более того как «часть космоса». Испускаемые Солнцем потоки электронов и электромагнитное излучение, заставляя содрогаться магнитосферу и атмосферу Земли, воздействуют на электромагнитные процессы в человеческом организме, инициируют определённые химические превращения, влияют на кровеносную и нервную системы.

Учитель. По-видимому, второе имя — это В. И. Вернадский?

Автор. Конечно. Академик В. И. Вернадский был убеждён, что жизнь есть явление космическое, её возникновение он рассматривал как процесс *самоорганизации* материи. Он дал знаменитый прогноз: в будущем человеческий разум будет сознательно направлять процесс эволюции земной биосферы — человечество вступит в эпоху ноосферы (ноосфера — сфера Разума). Идеи Вернадского имеют в наши дни такое же революционное значение, какое в своё время имели идеи Коперника, а позднее — Лайеля и Дарвина. «Он, как никто другой,— пишет о Вернадском С. Р. Микулинский, — видел проблемы комплексно и глобально. Там, где другие видели лишь частный, специальный вопрос, он раскрывал его взаимосвязь с другими явлениями, его место и роль в планетарном процессе... С большой силой и глубиной учёный показал влияние человеческой деятельности на природу, на среду обитания и экологию человека, на глобальные процессы на нашей планете. Он доказывал, что в результате развития науки и техники человеческая деятельность стала по своей мощи сравнима с геологическими факторами... Вернадский обладал поразительной способностью отчётливо видеть проблемы, с которыми в будущем предстоит столкнуться человечеству» [20, с. 5 – 6].

Учитель. Всё это исключительно интересно.

Автор. И очень важно. Школа буквально тонет в обилии рассматриваемых фактов, но не имеет ни времени, ни желания их осмысливать. *Миропонимание, смена основополагающих концепций, развитие мышления* — всё это остается за рамками школьных программ.

Учитель. Думаю, Вы правы. Тема «Научные революции и развитие науки», конечно, должна найти отражение в преподавании физики.

Автор. Эта тема имеет много граней. Она не исчерпывается проблемами переосмысления места человека в мире. Когда в середине прошлого века Максвелл и Больцман ввели *вероятность* в физику, они тем самым положили начало научной революции, завершившейся отказом от признания фундаментальности жёстких, однозначных причинно-следственных связей в пользу вероятностных (статистических) связей, отражающих *диалектику необходимого и случайного*. Великое научное достижение XIX столетия — открытие закона сохранения и превращения энергии (Джоуль, Майер, Гельмгольц) тоже явилось революционным актом; оно ознаменовало начало всеобъемлющего процесса *синтеза (интеграции)* научного знания.

Учитель. Думаю, что при всём разнообразии научных революций есть нечто общее для всех этих революций.

Автор. Да, есть. Известна склонность человека закреплять, *абсолютизировать достигнутую ступень познания* — сформировавшаяся парадигма всякий раз абсолютизируется, трансформируется в незыблемую научную традицию, возводится в некий непреложный догмат. Можно сказать, что человек склонен безоглядно привыкать к господствующей в данный период времени системе взглядов. Причём это характерно не только для на-

учной деятельности, но и для обычной житейской практики. Как сказал поэт,

Привычка свыше нам дана,
Замена счастию она...

И всё это есть не что иное, как проявление тяготения человеческого разума и всей психики человека к метафизической определённости и непротиворечивости, извечного стремления к традициям и столь же извечной неприязни ко всякого рода перестройкам. Взрывая сложившиеся догматы и традиции, научные революции всякий раз заставляют человека обращаться в восприятии и познании мира к диалектике. Можно сказать, что все научные революции — это всегда *преодоление метафизического абсолютизирования истины*, это скачки ко всё более глубокому пониманию диалектики мира. И пожалуй, особенно крупным таким скачком от метафизики к диалектике была научная революция на рубеже XIX — XX вв. — та самая, которую В. И. Ленин назвал «новейшей революцией в естествознании». Об этой революции мы подробно поговорим в своё время.

§ 3. МЕХАНИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

Становление механики. Многие столетия люди наблюдали падение подброшенного вверх камня. Г. Галилей (1564 – 1642) был первым, кто сумел разглядеть за этим падением определённый физический закон. Изучая кинематику движения тел, он фактически заложил основы той науки, которую мы сегодня называем *классической механикой*. Галилей рассматривал движение, используя понятие *инерции*. Это было принципиально важно и ново. Ведь господствовавшая в то время аристотелевская концепция движения понятия инерции не знала — считалось, что всякое движение (кроме так называемых естественных движений) требует непрекращающегося воздействия, прекращение воздействия приводит к немедленному прекращению движения. Галилей выступил против такой концепции. И не так уж важно, что он не дал формулировки закона инерции. «Важно, что в путанице земных движений Галилей выявил свойство тел сохранять свою скорость... Галилей совершенно правильно применил закон инерции в конкретных примерах и, что особенно важно, привлёк этот закон к обоснованию системы Коперника» [59, с. 65]. Используя понятие инерции, Галилей объяснил, почему Земля при движении по орбите вокруг Солнца (а также при вращении вокруг своей оси) сохраняет как атмосферу, так и всё, что находится в атмосфере и на земной поверхности. Мы не замечаем движения Земли, поскольку все явления на Земле происходят точно так же, как если бы она была неподвижной, — здесь проявляется открытый Галилеем принцип относительности для механических явлений. Сегодня он известен как принцип относительности Галилея.

До Галилея физика и математика существовали порознь. Физики были заняты умозрительным объяснением причин различных явлений, тогда как математики имели дело с искусственными моделями, которые придумывались только для описания наблюдаемых явлений (для «спасения явлений») и не претендовали на раскрытие их причин. Галилей «снимает различие между физикой как наукой, объясняющей причины движения, и математикой как наукой, позволяющей описать это движение, т. е. сформулировать его закон... У Галилея уже нет «зазора» между физическим опытом и математической теорией: математическая конструкция у Галилея не просто «спасает явления», но выражает саму их сущность» [25, с. 122 – 123]. Как один из основателей классической механики, Галилей сделал два принципиально важных шага: *обратился к физическому опыту и соединил физику с математикой*.

Физический эксперимент и математическое описание физических явлений — на «стыке» этих двух направлений, на их пересечении и родилась классическая механика.

Её становление и последующее развитие зависело, естественно, от активности действий в обоих указанных направлениях. Математическое направление активно развивалось Р. Декартом (1596 – 1650). Он заложил основы аналитической геометрии, применил её ап-

парат к описанию перемещений тел. Декарт разработал понятия *переменной величины* и *функции*; это позволило выдвинуть на передний план выявление законов движения и изменения, установление закономерных связей между элементами движущихся объектов. Именно на этом пути были впоследствии открыты уравнения движения.

В «Началах философии» Декарта, опубликованных в 1644 г., сформулированы три «закона природы» [41, с. 486 – 489]. Первые два выражают принцип инерции. Первый закон: «Каждая вещь, поскольку это зависит от неё, всегда сохраняет своё состояние, и если однажды пришла в движение, то таковое и будет продолжать». Второй закон утверждает, что хотя в действительности все движения круговые, однако каждое тело по отдельности всегда стремится продолжить движение по прямой линии («всякое движение само по себе является прямолинейным»). В третьем законе обычно усматривают не вполне удачно сформулированный закон сохранения количества движения: движущееся тело при столкновении с другим телом «теряет в своём движении столько, сколько сообщает второму телу». В этой формулировке содержалась явная физическая ошибка; на неё обратил внимание Х. Гюйгенс (1629 – 1695), интересовавшийся проблемами соударения тел и заложивший основы теории удара.

Решающий вклад в становление механики внес И. Ньютон (1643 – 1727). Именно в ньютоновской научной программе эксперимент начал, наконец, играть фундаментальную роль. Недаром Ньютон называл создаваемую им математическую физику «экспериментальной философией» и провозгласил принцип: «гипотез не измышляю». Если Декарт и его последователи шли от умозрительных «самоочевидных» общих положений («гипотез») к менее общим через дедукцию, то Ньютон предпочитал идти *от опыта к обобщениям на основе метода индукции*. Он противопоставлял отвлечённому рационализму Декарта продуманное экспериментальное обоснование получаемых результатов. Было бы, однако, неверно рассматривать метод Ньютона как чисто эмпирический. В действительности Ньютон уделял внимание осмыслению экспериментальных фактов, философским основаниям, отдавал должное (там, где он считал нужным) гипотезам и предположениям.

В 1687 г. вышел в свет фундаментальный труд И. Ньютона «Математические начала натуральной философии». Переводчик этого труда на русский язык академик А. Н. Крылов писал: «В этом сочинении всё было ново: начиная с аксиом или законов движения и кончая величайшим из законов природы — законом всемирного тяготения, математически выведенным из законов планетарных движений, данных Кеплером» [58, с. 5]. Ньютоновские «Начала» открываются своеобразным введением, где даются определения некоторых физических понятий и формулируются три основных закона (три аксиомы) движения — те самые законы динамики Ньютона, которые сегодня обязательно входят в учебники физики (как школьные, так и вузовские). Затем идёт изложение собственно «начал механики», разбитое на три книги, каждая из которых разделена на несколько отделов (всего 24 отдела). Ньютон начинает с того, что даёт определения массы, количества движения, силы. Вот как звучит в переводе, сделанном А. Н. Крыловым, ньютоновское определение силы:

«*Определение IV*. Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Пояснение. Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остаётся. Тело продолжает затем удерживать своё новое состояние вследствие одной только инерции» [58, с. 7].

Как видим, Ньютон рассматривает силу динамически (до Ньютона сила рассматривалась статически). Знаменитые *законы динамики* даны Ньютоном в следующей формулировке:

«*Закон I.* Всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.

Закон II. Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей

силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

Закон III. Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны» [58, с. 8].

В книге первой Ньютон даёт доказательство закона площадей при движении материальной точки под действием центральной силы, рассматривает задачу Кеплера (определение положения тела на орбите в данный момент времени), исследует задачу двух тел, ставит задачу трёх тел, даёт основы учения о притяжении сферических тел, приводит ряд оптических задач. Книга вторая содержит учение о движении тел в среде, сопротивление которой пропорционально первой или второй степени скорости. Здесь даны основы «метода флюксий» — так Ньютон называл *исчисление бесконечно малых* (на современном языке: дифференциальное и интегральное исчисление).

Книга третья «Начал» — «О системе мира» — заслуживает, пожалуй, особого внимания. Она начинается с четырёх правил (Ньютон назвал их «правилами умозаключений в физике»), отражающих *концепцию* учёного. Напомним, что эта концепция (когда от наблюдаемых и экспериментально исследуемых явлений идут к установлению первопричин) противостояла концепции Декарта, согласно которой первопричины открываются человеку благодаря проницательности его ума. Полагаем, что будет полезно привести здесь упомянутые четыре правила в формулировке Ньютона и с некоторыми его пояснениями:

«Правило I. Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений.

Пояснение. Природа проста и не роскошествует излишними причинами вещей.

Правило II. Поэтому, поскольку возможно, должно приписывать те же причины того же рода проявлениям природы.

Правило III. Такие свойства тел, которые не могут быть ни усилены, ни ослабляемы и которые оказываются присущими всем тем телам, над которыми возможно производить испытания, должны быть почитаемы за свойства всех тел вообще.

Пояснения. Свойства тел постигаются не иначе, как испытаниями; следовательно, за общие свойства надо принимать те, которые постоянно при опытах обнаруживаются и которые, как не подлежащие уменьшению, устранены быть не могут... Всеобщее тяготение подтверждается явлениями даже сильнее, нежели непроницаемость тел, для которой по отношению к телам небесным мы не имеем никакого опыта и никакого наблюдения...

Правило IV. В опытной физике предположения, выведенные из совершающихся явлений с помощью наведения (с помощью метода индукции — *Авт.*) несмотря на возможность противных им предположений, должны быть почитаемы за верные или в точности, или приближённо, пока не обнаружатся такие явления, которыми они ещё более уточнятся или же окажутся подверженными исключениям. Так должно поступать, чтобы доводы наведения не уничтожались предположениями» [58, с. 12 – 13].

Далее в третьей книге рассматриваются различные астрономические явления, показывается, что Луна и спутники Юпитера и Сатурна следуют законам Кеплера при движении около своих планет, точно так же как сама Земля и другие планеты следуют этим законам при движении вокруг Солнца. Здесь же устанавливается знаменитый *закон всемирного тяготения*, после чего Ньютон переходит к определению орбит комет.

Как известно, одновременно с Ньютоном и независимо от него разработал основы дифференциального и интегрального исчисления Г. Лейбниц (1646 – 1716). Этот факт нашёл отражение в ньютоновских «Началах». Ньютон писал: «В письмах, которыми около десяти лет тому назад я обменивался с весьма искусным математиком Г. Лейбницем, я ему сообщал, что я обладаю методою для определения максимумов и минимумов, проведения касательных и решения тому подобных вопросов... Знаменитейший муж отвечал мне, что он также напал на такую методу, и сообщил мне свою методу, которая оказалась едва отличающейся от моей, и то только терминами и начертанием формул» [58, с. 12].

Исаак Ньютон — грандиозное и удивительнейшее явление в истории науки. Он подо-

бен некоему узлу, в котором сошлись нити из прошлых веков и из которого берут начало нити, протянувшиеся в будущие века. С одной стороны, он сделал решающий, можно сказать, *завершающий шаг на пути становления классической механики* (об оптических и прочих исследованиях Ньютона мы сейчас не говорим). До Ньютона механика только ещё создавалась, *после Ньютона она уже существует*. С другой стороны, Ньютон предопределил дальнейшее бурное развитие физической науки вообще и механики в частности. Через 9 лет после его смерти, в 1736 г. выходит в свет «Механика» Л. Эйлера (1707 – 1783), где ньютоновская механика излагается аналитически (сам Ньютон пользовался языком геометрии). Ещё через 7 лет выходит «Трактат о флюксиях» К. Маклорена (1698 – 1746), в котором показано, что любую задачу о движении точки можно привести к математической задаче об интегрировании определённой системы дифференциальных уравнений. Переход от уравнений движения точки к уравнениям движения твёрдого тела осуществил ещё через 20 лет всё тот же Л. Эйлер — в 1765 г. вышла его «Механика твёрдого тела». Особую стройность приобрела ньютоновская механика в изданной в 1788 г. «Аналитической механике» Ж. Л. Лагранжа (1736 – 1813).

Мир Декарта и мир Ньютона. Декарт и Ньютон — два принципиально разных подхода к постижению мира. У Декарта на первом месте проницательность ума; он уверен, что можно *чисто умозрительно*, с помощью логических рассуждений построить картину мира. Ньютон исходил из *экспериментальных исследований* — он шёл к картине мира не от изящных догадок и озарений, а от результатов тщательно продуманных опытов. Естественно, что миры Декарта и Ньютона оказались весьма разными. И хотя мы, безусловно, отдаём предпочтение научности ньютоновского подхода к изучению природы, тем не менее мы не можем не уделить внимания также Декарту. Ньютоновская картина мира создавалась, в известном смысле, в борьбе с картезианскими представлениями (картезианцами называли последователей Декарта; Картезий — латинизированное имя Декарта). «Картезианской физике суждено было в её специфических учениях полностью быть отвергнутой позднейшей историей науки. Но как бы это ни казалось парадоксальным, почти невозможно представить себе, чем была бы эта последняя без физики Декарта» [10, с. 30].

Итак, познакомимся с *миром Декарта*. В этом мире материя тождественна пространству, всё пространство заполнено материей, пустоты нет. Атомы отрицаются, материя делима до бесконечности. Предоставим слово самому Декарту: «Пространство, или внутреннее место, разнится от телесной субстанции, заключённой в этом пространстве, лишь в нашем воображении. В действительности же протяжение в длину, ширину и глубину, составляющее пространство, составляет и тело...» [41, с. 469].

«Если спросят, что случилось бы, если бы Бог устранил тело, содержащееся в данном сосуде, и не допустил, чтобы другое тело проникло на покинутое место, то на этот вопрос нужно ответить: в таком случае стороны сосуда сблизятся настолько, что непосредственно сомкнутся, ибо когда между двумя телами не находится ничего, то они необходимо должны касаться друг друга» [41, с. 474].

«Невозможно существование каких-либо атомов, неделимых по своей природе, как это вообразили некоторые философы... Если бы Бог и сделал частицу столь малой, что невозможно было бы её разделить чему-нибудь сотворённому Богом, то самого себя он не мог бы лишить власти разделить её, ибо совершенно невозможно, чтобы Бог умалил своё могущество...» [41, с. 475]. Все явления Декарт сводит к механическим перемещениям. Все взаимодействия осуществляются через давления, столкновения — одни части материи давят на другие, толкают их. Но как же возможно движение в мире, полностью заполненном материей? Очень просто, — объясняет Декарт, — одно тело вступает на место второго, выталкивая его со своего места, это второе вступаем на место третьего, третье — на место четвёртого; и таким путём до тех пор, пока последнее тело не займёт место первого. В результате получается вихревое движение (движение по кругу). Весь мир, по Декарту, заполнен разнообразными *вихрями*.

Заметим, что беспредельную делимость материи Декарт не вполне последовательно

сочетает с существованием «частиц материи» («частиц пространства»?), коих различает три типа: вездесущие частицы неба, частицы огня и частицы плотной материи. В целом схема мира по Декарту такова. Есть два начала — материя и движение. Движение производится силой, исходящей от бога. Эта же сила делит непрерывную материю на части и частицы и сохраняется в них, являясь источником их кругового (вихревого) движения, при котором одни части (частицы) выталкиваются со своих мест другими.

Как же представлял себе мир Ньютон? Он полагал, что есть пустое пространство и есть корпускулы, из которых построены тела. Как и у Декарта, все явления сводятся к механическим перемещениям, однако эти перемещения не сводятся к вихрям. Взаимодействие тел не только при соударениях, но также и на расстоянии есть всемирное тяготение. Установив закон всемирного тяготения, Ньютон в то же время не дал объяснения причин тяготения (за что подвергался критике со стороны картезианцев). Как передаётся через пустоту взаимодействие тел? Молодой Ньютон склонен был считать, что взаимодействие через пустоту осуществляет бог. Позднее он приходит к гипотезе эфира, которой было суждено сыграть важную роль в истории физической науки. Заканчивая «Математические начала натуральной философии», Ньютон пишет: «Теперь следовало бы кое-что добавить о некоем тончайшем эфире, проникающем все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою частицы тел взаимно притягиваются...» Впрочем, оставаясь верным своим принципам, учёный тут же замечает: «Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны» [87, с. 662].

И Декарт, и Ньютон принимают во внимание инерцию. Предоставленное самому себе тело должно двигаться прямолинейно и равномерно. В действительности же часто приходится наблюдать движения криволинейные. По Декарту, криволинейное движение объясняется искривлением траектории тела из-за механического препятствия, оказываемого телу другими частями пространства-материи. По Ньютону, искривление траектории происходит вследствие притяжения одного тела другим. В те времена Лондон был центром ньютонианства, а Париж — картезианства. Имея это в виду, Вольтер писал в 1731 г. в «Философских письмах»: «Когда француз приезжает в Лондон, то находит здесь большую разницу как в философии, так и во всём другом. В Париже, из которого он приехал, думают, что мир наполнен материей, здесь же ему говорят, что он совершенно пуст; в Париже вы видите, что вся вселенная состоит из вихрей тонкой материи, в Лондоне же вы не видите ничего подобного; во Франции давление Луны производит приливы и отливы моря, в Англии же говорят, что это само море тяготеет к Луне... Картезианцы говорят, что всё совершается вследствие давления, и этого мы не понимаем; здесь же ньютонианцы говорят, что всё совершается вследствие притяжения, которое мы не лучше понимаем...» [59, с. 127]. Сопоставляя позиции Декарта и Ньютона, французский философ-просветитель Э. Кондильяк (1715 – 1780) отмечал: «Декарт, чтобы построить вселенную, просит у Бога лишь материю и движение. Но когда этот философ хочет осуществить то, что он обещает, он лишь замысловат. Сначала он справедливо замечает, что части материи должны стремиться двигаться по прямой и что, если они не встречают препятствий, все они будут продолжать движение в этом направлении. Затем он предполагает, что всё заполнено, или скорее умозаключает об этом из того понятия, какое он себе составил о предмете, и видит, что части материи, пытаясь двигаться во всевозможных направлениях, должны препятствовать движению друг друга. Значит, они будут неподвижны? Нет. Декарт замысловато объясняет, каким образом они будут двигаться кругообразно и образуют различные вихри. Ньютон нашёл чересчур много затруднений в этой системе. Он отбросил заполненность всего пространства как предположение, с которым нельзя примирить движение. Не пытаясь построить мир, он довольствовался тем, что наблюдал его... Он, следовательно, не намеревался отгадать или выдумать первоначала природы. Он наблюдал и искал, нет ли среди явлений такого, которое можно было бы рассматривать как первопричину...» [56, с. 160 – 161].

Атомисты XVII — XVIII вв. Как уже отмечалось, Декарт полагал, что вся материя состоит из «частиц» трёх типов; тем самым он выступал с позиций атомизма. Однако позиция его была непоследовательной, поскольку материя отождествлялась с пространством. Картезианцы резко отвергали учение Демокрита и Эпикура об атомах и пустоте. Последовательным сторонником атомистического учения являлся Ньютон. Ещё ранее, в первой половине XVII в., это учение поддерживал П. Гассенди (1592 – 1655). Именно Гассенди был первым серьёзным критиком теории вихрей Декарта. Атомы у Гассенди представлялись в виде мельчайших физических телец разнообразной формы (круглые, овальные, чечевицеобразные, плоские, конические, крючковидные и даже мохнатые). Впервые в науке Гассенди ввёл понятие молекулы; он рассматривал молекулу как соединение (сцепление) нескольких атомов.

Видным атомистом XVII столетия был Х. Гюйгенс (1629 – 1695). Главным свойством атома он полагал бесконечную твёрдость, противостоящую любым попыткам разделить атом на части. Вслед за Гассенди Гюйгенс отвергал декартовские представления о том, что источником движения является бог. Движение есть свойство самой материи — так считали и Гассенди, и Гюйгенс. Оно проявляется в перемещениях и столкновениях атомов и «само себя сохраняет». Эти взгляды не разделял другой видный атомист — Р. Бойль (1627 – 1691). По Бойлю, мир — это сложный механизм, который запускает в работу искусный механик, т. е. бог. В те времена химия представляла собой своеобразное искусство, занимавшееся превращениями различных веществ. Бойль стремился превратить химию в науку и считал, что в основе этой науки должны лежать принципы атомизма.

Весьма интересны атомистические представления хорватского учёного XVIII столетия Р. Бошковича (1711 – 1787). У Бошковича атомы — это не частички вещества, а некие точки, рассматриваемые им как «силовые центры». Эти «центры» распределены в пустоте на разных расстояних друг от друга. Все «центры» одинаковы; различие свойств веществ объясняется различием во взаимном расположении «центров», из которых состоят эти вещества. Сила взаимодействия двух «центров» зависит от расстояния между ними. На очень малых расстояниях действуют мощные силы отталкивания, не позволяющие «центрам» приблизиться друг к другу вплотную. По мере увеличения расстояния между «центрами» силы отталкивания уменьшаются и сменяются силами притяжения, которые сначала растут, а затем уменьшаются, сменяясь, в свою очередь, силами отталкивания; отталкивание и притяжение чередуются. На относительно больших расстояниях действуют только силы притяжения, они постепенно затухают с расстоянием по ньютоновскому закону (обратно пропорционально квадрату расстояния). Представления Бошковича — по сути дела, первая попытка ввести в физическую картину мира силовые поля. Эти представления оказали впоследствии значительное влияние на взгляды М. Фарадея.

Убеждённым атомистом был наш великий соотечественник М. В. Ломоносов (1711 – 1765). Он считал, что вещество состоит из мельчайших частиц — атомов (по Ломоносову, «элементов») и их сочетаний — молекул («корпускул»). Именно Ломоносов был первым, кто стал связывать тепловые явления с движением корпускул; поэтому он по праву может считаться одним из основоположников *молекулярно-кинетической* теории теплоты. В работе «Размышления о причине тепла и холода» (1747) он решительно выступил против господствовавшей в то время концепции теплорода; он утверждал, что температура тела связана вовсе не с количеством теплорода в теле, а с интенсивностью движения корпускул, составляющих тело. Проведённые исследования привели Ломоносова к выводу, что никакого теплорода вообще не существует. В 1760 г. в работе «Рассуждение о твёрдости и жидкости тел» он писал: «Доказано мною прежде сего, что элементарный огонь аристотельский, или, по новых учёных штилю, теплотворная особливая материя (иначе говоря, теплород. — *Авт.*), которая, из тела в тело переходя и странствуя, скитается без всякой малейшей вероятной причины, есть один только вымысел; и купно утверждено, что огонь и теплота состоят в коловратном движении частиц, а особливо самой материи, тела составляющих» [67, с. 389]. Обратим внимание на слова «коловратное движение». Гипотеза

вращательного теплового движения молекул понадобилась Ломоносову для объяснения их сильного отталкивания друг от друга при столкновениях. По-видимому, на учёного оказала влияние знакомая с детства картина отскакивания волчков («кубарей»), пускаемых мальчишками по льду.

Мир как сложный и точный часовой механизм. Всякое живое существо, всякая тварь — это *механизм,* а бог-творец — искуснейший механик. Такие представления начали формироваться еще в XIII — XIV вв. В XVII и особенно XVIII столетии уже весь мир в целом, вся природа стали уподобляться некоему сложному механизму.

Любой механизм состоит из многих деталей. Они могут быть весьма разнообразными. В качестве мельчайших «деталей» могут рассматриваться, в конечном счёте, атомы (корпускулы). Недаром, начиная с XVII в., вновь оживает атомистическая концепция, которую в течение многих веков отодвигала на задний план аристотелевская физика. Постепенно формируется новая парадигма: все явления имеют чисто механическое объяснение, функционирование всех деталей природного механизма — как относительно крупных, так и мельчайших (корпускул) — происходит в соответствии со строгими законами механики. Формированию этой парадигмы в немалой степени способствовали успехи математики, благодаря им законы механики приобрели весьма изящную форму.

Период становления механики довольно быстро превратился в период её расцвета и, более того, период торжества. *Механика стала основой мировоззрения*. Всё, что создал сам человек, всё, что есть в природе, имеет, считалось, *единую механическую сущность*. «Между машинами, сделанными руками мастеров, и различными телами, созданными природой, — писал Декарт, — я нашёл только ту разницу, что действия механизмов зависят исключительно от устройства различных трубок, пружин и иного рода деталей, которые, находясь по необходимости в известном соответствии с изготовившими их руками, всегда настолько велики, что их фигура и движения легко могут быть видимы, тогда как трубки и пружины, вызывающие действия природных вещей, обычно бывают столь малы, что ускользают от наших чувств. И ведь несомненно, что в механике нет правил, которые не принадлежали бы физике, поэтому все искусственные предметы вместе с тем предметы естественные» [41, с. 539 – 540]. Итак, принципиальной разницы между искусственным и естественным не существует; просто бог-творец является значительно более искусным механиком, чем человек, его произведения оказываются существенно более тонкими и изощрёнными. Декарту вторит Лейбниц: «Всякое органическое тело живого существа есть своего рода божественная машина, или естественный автомат, который бесконечно превосходит автоматы искусственные. Ибо машина, сооружённая искусством человека, не есть машина в каждой своей части; например, зубец латунного колеса состоит из частей, которые уже не представляют более для нас ничего искусственного... Но машины естественные, т. е. живые тела, и в своих наименьших частях, до бесконечности продолжают быть машинами. В этом и заключается различие между природой и искусством, т. е. между искусством божественным и нашим» [25, с. 14].

Это была эпоха, когда мир действительно представлялся единым. Но такое единство не было диалектическим; это не было единство разнообразного, это было однообразное, *метафизическое* единство, единство всеобъемлющей механической системы.

Считалось, что сложность мировой механической системы сочетается с исключительно высокой точностью. Именно поэтому учёные и мыслители XVII — XVIII вв. часто обращались к образу часов. Мир подобен гигантскому *часовому механизму*, созданному богом. В этом часовом механизме всё целесообразно — как в целом, так и в отдельных его частях. Бойль писал: «Это так, как в редкостных часах, например, находящихся в Страсбурге, где всё искусно слажено. И когда механизм приведён в движение, всё происходит в соответствии с первоначальным замыслом мастера» [25, с. 230].

Многие мыслители той эпохи полагали, что природный часовой механизм настолько сложен, что наука (человек) не в состоянии разобраться во всех его деталях. Но это, как считали они, и не требуется — важно не внутреннее устройство часов, а время, какое они

показывают. Надо лишь, чтобы реконструируемые учёными часы показывали время *одинаково* с природными часами. Активным сторонником такой позиции был Р. Декарт. «Я почту себя удовлетворённым, — писал он, — если объяснённые мною причины таковы, что все действия, какие могут из них произойти, окажутся подобными действиям, замечаемым нами в явлениях природы». Декарт подчёркивал: «Подобно тому, как один и тот же искусный мастер может изготовить несколько часов так, что и те и другие одинаково станут указывать время и внешне будут вполне подобны друг другу, хотя бы и не было никакого сходства в составе их колёс, точно так же несомненно, что и высочайший мастер — Бог — владеет бесчисленным множеством средств, коими он мог достигнуть того, чтобы все вещи здешнего мира казались такими, какими они ныне кажутся, между тем как ум человеческий бессилен постичь, какие из этих средств угодно ему было применить для этого» [41, с. 54 – 541].

Итак, бог сотворил мировой часовой механизм и запустил его в работу. А какова дальнейшая роль бога? На этот счёт мнения расходились. Одни полагали, что бог *непрерывно поддерживает* работу созданного им механизма и поэтому как бы оставляет за собой право корректировать законы природы; такой точки зрения придерживался, например, Р. Бойль. Другие (явное большинство физиков) полагали, что, запустив мировой часовой механизм в работу, дав ему начальный толчок, бог в дальнейшем как бы самоустранился, так что запущенный им в действие механизм природы функционирует по *объективным законам*, исключающим «промысел божий». Такая точка зрения соответствует *деизму* — философскому учению, по которому бог есть безличная первопричина мира, находящаяся вне его и не вмешивающаяся в развитие природы и общества. Деизм был определённым шагом на пути к *материалистическому миропониманию*. Как отмечал К. Маркс, это был фактически «не более, как удобный и лёгкий способ отделаться от религии» [1, с. 144].

Философия деизма опиралась на признание существования только жёстких, *однозначных* причинно-следственных связей. Дарованные богом первичные алгоритмы (если использовать современный язык) *однозначно определяют раз и навсегда* всё последующее существование и развитие мира. То, что есть сегодня, с необходимостью возникло из того, что было вчера, и с той же неумолимой необходимостью предопределяет то, что будет завтра. Такое жёсткое понимание причинности является краеугольным камнем в *механической картине* мироздания. Оно вошло в историю науки под термином «лапласовский детерминизм», так как именно П. С. Лаплас (1749 – 1827) наиболее чётко сформулировал идейную платформу механицизма. Он писал: «Мы должны рассматривать современное состояние вселенной как результат предшествовавшего состояния и причину последующего. Разум, который для какого-то данного момента времени знал бы все силы, действующие в природе, и относительное расположение её частей, если бы он, кроме того, был достаточно обширен, чтобы подвергнуть эти данные анализу, обнял бы в единой формуле движения самых огромных тел во вселенной и самого лёгкого атома. Для него не было бы ничего неясного, и будущее, как и прошлое, было бы у него перед глазами... Кривая, описываемая молекулой воздуха или пара, управляется столь же строго и определённо, как и планетные орбиты; между ними лишь та разница, что налагается нашим неведением» [63, с. 364].

Основные черты механической картины мира. Формирование механической картины мира потребовало нескольких столетий; практически оно завершилось лишь к середине XIX в. Эту картину надо рассматривать как важную ступень в познании человеком окружающего мира. Каким представлялся этот мир? Все тела — твёрдые, жидкие, газообразные — состоят из атомов и молекул, находящихся в никогда не прекращающемся тепловом движении. Взаимодействие тел происходит как при их непосредственном контакте (силы упругости, трения), так и на расстоянии (силы тяготения). Всё пространство заполняет всепроникающий эфир. Атомы воспринимаются как некие цельные, неделимые «кирпичики» вещества; сцепляясь друг с другом, они образуют молекулы и, в конечном счёте, все тела. Природа этого «сцепления», по сути дела, не исследуется; предполагается

чисто механическое сцепление. Нет понимания сущности эфира, поэтому создаются его разнообразные модели: абсолютно несжимаемый эфир, эфир твёрдый для быстрых изменений, но текучий для медленных, эфир, состоящий из мельчайших «шестерёнок», «волчков», и т. д.

Говоря о механической картине мира, выделим четыре принципиальных момента. Во-первых, мир в этой картине строился на едином фундаменте — на *законах механики Ньютона*. Все наблюдаемые в природе превращения, а также тепловые явления *сводились на уровне микроявлений к механике атомов и молекул* — их перемещениям, столкновениям, сцеплениям, разъединениям. Открытие в середине XIX в. закона сохранения и превращения энергии, казалось, окончательно доказывало *механическое единство мира* — ведь все виды энергии можно теперь «свести» к энергии механического движения! Поистине мир выглядел гигантской машиной, построенной по законам механики и по этим же законам функционирующей. Правда, во второй половине XVIII в. и особенно в XIX в. развернулись исследования электрических и магнитных явлений. Однако поначалу они, как казалось, не подрывали, а всего лишь усложняли, дополняли механическую картину мира. Именно под таким углом зрения рассматривалось, например, внешнее сходство закона Кулона с законом всемирного тяготения.

Во-вторых, механическая картина мира исходила из представления, что *микромир аналогичен макромиру*. Была хорошо исследована механика макромира; считалось, что *точно такая же* механика описывает движения атомов и молекул. Как движутся и сталкиваются обычные тела, точно так же движутся и сталкиваются атомы. Напомним, что у Лапласа: «кривая, описываемая молекулой воздуха или пара, управляется столь же строго и определённо, как и планетные орбиты». Считалось, что как неживая, так и живая материя «сконструирована» из одних и тех же «механических деталей», различающихся размерами. Человек конструирует разные механизмы из относительно крупных (грубых) деталей, тогда как творец, конструируя живые объекты, использует детали несравненно более мелкие и тонкие. Итак, в основе всего мира, по сути дела, одни и те же «механические детали». Более того, возникал вопрос: не являются ли сами эти детали конструкциями из ещё более мелких деталей? Характерная для механического мировоззрения привычка *видеть в малом то же, что имеется в большом*, но лишь в меньших размерах, порождала представления о мире, похожем на вставленных одна в другую матрёшек. Отголоски подобных представлений звучат как поэтическая метафора в прекрасном стихотворении В. Я. Брюсова:

Быть может, эти электроны —
Миры, где пять материков,
Искусства, знанья, войны, троны
И память сорока веков!
Ещё, быть может, каждый атом —
Вселенная, где сто планет;
Там всё, что здесь, в объёме сжатом,
Но также то, чего здесь нет.
Их меры малы, но всё та же
Их бесконечность, как и здесь;
Там скорбь и страсть, как здесь, и даже
Там та же мировая спесь.

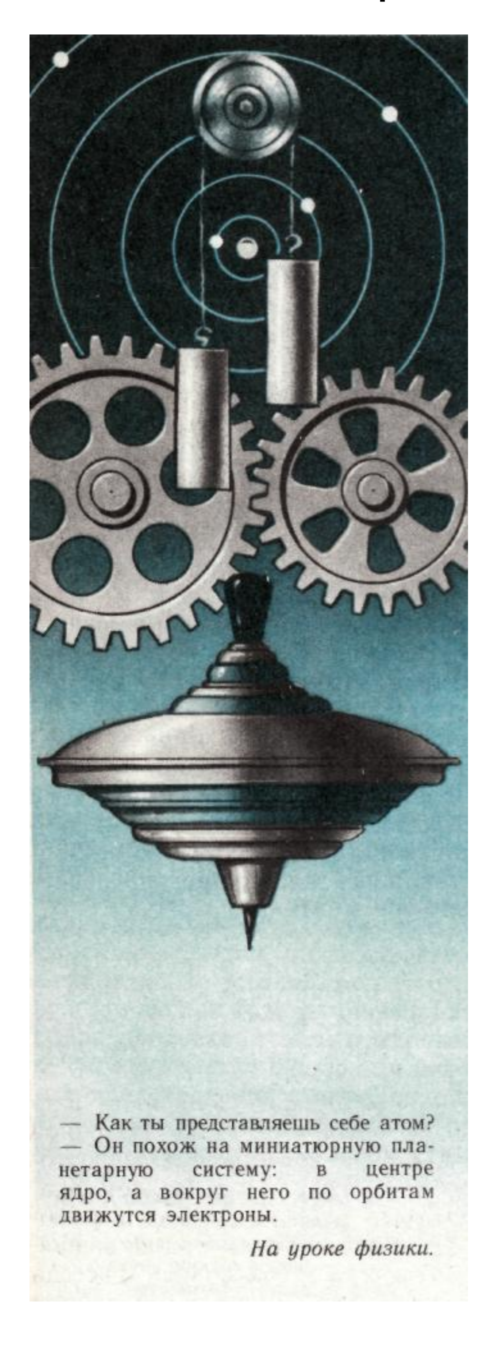
В-третьих, в механической картине мира *отсутствует развитие* — мир в целом таков, каким он был *всегда*. Ф. Энгельс отмечал, что для рассматриваемой эпохи была характерна «выработка своеобразного общего мировоззрения, центром которого является представление об *абсолютной неизменяемости природы*» [2, с. 348]. Ведь все наблюдаемые явления, все превращения — не более, как механические перемещения и столкновения атомов. Всё происходящее — это исправное функционирование умело сконструиро-

ванного природного механизма. Неудивительно, что в биологии XVIII в. господствовала концепция *преформизма*, согласно которой в яйцеклетке любого живого существа уже содержится в миниатюре будущий взрослый организм; в зародышах заключены свои зародыши — и так до бесконечности. Таким образом, механическая картина мира фактически отвергала *качественные* изменения, сводя всё к изменениям чисто *количественным*. В этом и виделся залог *незыблемости* природы.

В-четвёртых, в механической картине мира все причинно-следственные связи — *однозначные*, здесь господствует *лапласовский детерминизм*. Мир функционирует с точностью и предопределённостью отлаженного часового механизма. Правда, в середине XIX в. Максвелл, а затем Больцман ввели в физику вероятность, однако это не представлялось в то время принципиальным. Полагали, что использование вероятностей связано с нашим незнанием всех деталей сложного механизма природы, с нашим неведением. Говоря об одинаковом характере движения молекул воздуха и планеты, Лаплас отмечал: «между ними лишь та разница, что налагается нашим неведением».

Таковы основные черты механической картины мира — парадигмы, господствовавшей в естествознании на протяжении нескольких столетий (вплоть до второй половины XIX в.). По самой своей сути эта картина мира являлась *метафизической* — в ней отсутствовали внутренние противоречия и, как следствие, качественное развитие, всё происходящее в мире представлялось жёстко предопределённым, всё многообразие мира сводилось к механике.

Диалог. О привычке мыслить механистически



— Как ты представляешь себе атом?
— Он похож на миниатюрную планетарную систему: в центре ядро, а вокруг него по орбитам движутся электроны.

На уроке физики.

Учитель. А нужно ли было уделять столько внимания механической картине мира? Ведь это давно пройденный этап. На смену механической картине пришла, как известно, электромагнитная, а ту, в свою очередь, сменила современная естественнонаучная картина мира.

Автор. Вы хотите сказать, что механическая концепция — архаизм, не заслуживающий сегодня особого внимания? Конечно, это архаизм. Но он исключительно живуч. *Мы привыкли мыслить механистически, любим строить механические модели.* Между прочим, преподавание физики в школе и по сей день строится в значительной мере на основе механистической концепции.

Учитель. Признаться, я над этим не задумывался. Разумеется, если речь идёт о преподавании механики...

Автор. Всё значительно серьёзнее. Во-первых, механицизм проявляется в явно *преувеличенном внимании к механике*; преподавание физики построено таким образом, что именно этот её раздел формирует позицию школьника, его отношение ко *всей* физике, именно здесь, в механике, он знакомится с такими понятиями, как «физическая величина» и «физическая закономерность». Во-вторых, *механистическое видение* природы проходит красной нитью через остальные разделы физики. Уподобляясь учёным XVIII столетия, мы стремимся насытить механическими моделями все разделы физики, испытываем удовлетворение, когда какое-нибудь явление удаётся объяснить на языке механики.

Учитель. Не могли бы Вы привести примеры?

Автор. Сколько угодно. Движение электронов в атоме рассматриваем по аналогии с движением планет вокруг Солнца. Электрическое сопротивление объясняем механически — как результат столкновений электронов проводимости с атомами, образующими кристаллическую решётку металла. В любой школе используются конструкции из шариков, соединённых железными прутьями, которые моделируют молекулы. Механистические представления привлекаются при обсуждении молекулярно-кинетической концепции тепловых явлений. Так, давление газа на стенку определяется импульсом, передаваемым единичной площадке в единицу времени в результате механической бомбардировки стенки молекулами газа. Наконец, температура выражается через среднюю кинетическую энергию молекул.

Учитель. Но чем же это плохо? Мы всегда стремимся к тому, чтобы школьник получил *наглядное* представление о той или иной физической величине, том или ином явлении. Разве это не способствует лучшему усвоению изучаемого материала?

Автор. Вы правы — механические модели выигрышны тем, что они наглядны; их можно хорошо себе представить. И это, конечно, важно. Поэтому *никто не возражает*

против их использования. Опасность состоит в том, что *возникает привычка мыслить механистически* — придавать механическим моделям *буквальный смысл*, не видеть их условности, ограниченности, приблизительности. Это чревато чрезмерным упрощением и, в конечном счёте, искажением действительности.

Учитель. Но газ действительно состоит из молекул, которые налетают на стенку и тем самым создают давление на неё. Электронам проводимости действительно мешают перемещаться по кристаллу атомы, образующие кристаллическую решётку. В атоме действительно есть электроны, движущиеся вокруг ядра.

Автор. Всё это так, и в то же время не совсем так. Газ действительно состоит из движущихся молекул, однако движение молекул не подчиняется, строго говоря, законам Ньютона. Лаплас был не прав, говоря, что молекула в воздухе движется так же, как движется планета по орбите. Когда мы объясняем давление газа на стенку упругими ударами о стенку молекул-шариков, мы упрощаем действительную ситуацию, работаем в рамках некоего приближения.

Учитель. Разве это приближение слишком грубо?

Автор. Это зависит от рассматриваемой задачи. Для одной задачи данное приближение годится, для другой может оказаться грубым. Мы всегда работаем в каком-то приближении, мы всегда использовали и всегда будем использовать различные механические модели. Но принципиально важно, чтобы эти модели *не абсолютизировались.* Поэтому нужно, пользуясь ими, подчёркивать их приближённость, показывать, в чём именно эта приближённость заключается. Кстати говоря, электрическое сопротивление обусловлено не самими атомами решётки кристалла, а тепловыми колебаниями этих атомов. Без этого уточнения невозможно подступиться к объяснению сверхпроводимости. Электронных же орбит в атомах попросту нет — здесь, надо признать, механическая модель вообще непригодна.

Учитель. А нельзя ли всё-таки обойтись без всех этих тонкостей? Может быть, имеет смысл пойти на *упрощение* курса физики ради того, чтобы он был *более понятным*?

Автор. Тогда надо честно признать, что в школе мы изучаем *только* механическую картину мира, в которую внесены некоторые дополнения, введены какие-то новые термины. Атомы, электроны, атомные ядра будут выступать здесь как маленькие механические объекты, ничем принципиально не отличающиеся от обычных объектов. Важно понять, что на основе классической механики, в рамках механистических представлений нельзя построить *современный* курс физики.

Учитель. Но в современной физике широко применяются такие законы механики, как законы сохранения энергии, импульса, момента импульса. Более того, современная физика относит эти законы механики к фундаментальным законам.

Автор. Не надо считать, что законы сохранения энергии, импульса, момента импульса — это законы механики. Они имеют такое же отношение к механике, как и к другим областям физики. Просто школьников знакомят с ними при изучении именно механики, а потом почему-то к ним не обращаются. Вот и возникает ложная мысль о принадлежности этих законов механике.

Учитель. Итак, насколько я понял, механическими моделями пользоваться можно и нужно; важно, чтобы при этом не возникала привычка мыслить механистически, привычка сводить всё к механике.

Автор. Именно так. *Сами по себе механические модели весьма полезны в методическом отношении — опасна лишь их абсолютизация*. Нельзя, чтобы школьник отождествлял идею единства мира с механическим единообразием, чтобы он полагал, будто углубление процесса познания материи неизбежно предполагает бесконечное раздробление её на всё более малые части, чтобы все причинно-следственные связи он рассматривал как однозначные. Нельзя понять сущность современной научной картины мира, не осознав ограниченности механистических концепций. Вот почему мы уделили значительное внимание механической картине мира.

Учитель. Возникает вопрос о том, как и в какой мере следует использовать механистические концепции в преподавании физики.

Автор. Этот вопрос достаточно сложен. От того, как он будет решён, зависит многое. Я имею в виду проблему создания подлинно современного школьного курса физики.

§ 4. УДИВИТЕЛЬНЫЙ ДЕВЯТНАДЦАТЫЙ ВЕК

В начале века... К началу XIX в. физика уже представляла собой вполне развитую самостоятельную науку, накопившую огромный *эмпирический материал*, который предстояло систематизировать, обобщить, осмыслить. «Она вступила в новый век, будучи как бы наскоро сколоченной из различных учений, одни из которых возникли ещё в давние времена и явно устарели, другие были созданы сравнительно недавно, но по старым трафаретам. Ньютоновский феноменологический метод считался основным и общепризнанным. Механика, вооружённая методами математического анализа, была превращена в мощное орудие исследования. Физический эксперимент стал по преимуществу количественным, измерительным и достиг высокой точности во многих отраслях, опираясь на быстро развивающееся, хотя всё ещё кустарное приборостроение» [45, с. 8].

В те времена на первом плане была задача *измерения*, накопления эмпирических данных, фактов. Измерения развернулись во всех областях физического знания: измерялись механические, гидродинамические, тепловые, оптические, электрические величины. Изобретались и совершенствовались разнообразные *физические приборы* и *устройства*. Чтобы дать некоторое представление о масштабах развернувшегося физического творчества, приведём далеко не полный перечень изобретений, сделанных в XVIII в.: газовый термометр Г. Амонтона (1703), термометры Г. Фаренгейта (1709), Р. Реомюра (1730), А. Цельсия (1742), стеклянная электрическая машина Ф. Гауксби (1706), электроскопы Ж. Нолле (1747), А. Вольты (1782), А. Беннета (1786), первый электрический конденсатор — лейденская банка Э. Клейста и П. Мушенбрука (1745), электрометр Д. Элликота (1746), молниеотвод Б. Франклина (1750), калориметры Д. Блэка (1762) и А. Лавуазье и П. Лапласа (1780), электрофор А. Вольты (1775), гигрометр Ж. Делюка (1781), фотометр П. Бугера (1740), дифракционная решетка Д. Риттенгауса (1786), первый источник постоянного электрического тока — «вольтов столб» (1800).

Физика на рубеже XVIII — XIX вв. — это достигшая высокого совершенства аналитическая механика плюс богатейший эмпирический материал. Этот материал позволил сделать ряд верных заключений, но в основном он ещё не получил должного осмысления. Факты рассматривались *порознь*, им часто давалось *надуманное толкование*. Широко использовались представления о разных *флюидах*, невесомых «жидкостях», субстанциях; с их помощью пытались объяснить те или иные наблюдаемые факты. Электрические и магнитные явления рассматривались независимо друг от друга. С магнитными явлениями связывали наличие в телах (в магнитах) двух разнородных магнитных жидкостей, одна из которых якобы накоплялась у северного полюса магнита, а другая — у южного. Электрические явления также объясняли существованием двух особых жидкостей. Считалось, что если в теле имеется одинаковое количество той и другой жидкости, то происходит их взаимная компенсация; такое тело электронейтрально. Преобладание в теле той или иной жидкости делает его заряженным; знак заряда зависит от того, какой именно вид электрической жидкости преобладает. Б. Франклин (1706 – 1790) исходил из существования одной электрической жидкости. Он полагал, что тело наэлектризовано либо потому, что имеет избыток этой жидкости, либо, напротив, недостаток; в первом случае оно заряжено положительно, а во втором — отрицательно. По мере накопления эмпирического материала вопрос о том, что такое электричество, начал быстро усложняться. В дополнение к известному Франклину электричеству, получающемуся при трении («статическому», или, как стали говорить, «обыкновенному»), стали рассматривать, начиная с 80-х годов XVIII в., так называемое «животное» электричество, а в самом конце века появилось ещё

и «вольтово» электричество. О «животном» электричестве заговорили после знаменитых экспериментов Л. Гальвани (1737 – 1798) с лягушками, фактически положивших начало электрофизиологии. «Вольтово» электричество вошло в науку после изобретения А. Вольтой (1745 – 1827) первого источника тока, явившегося первым в мире гальваническим элементом. Умножение видов электричества продолжалось и в первой половине XIX в.: появилось «термоэлектричество», а затем «магнитоэлектричество». В области тепловых явлений господствовала в XVIII и первой половине XIX в. идея особой тепловой жидкости — теплорода (теплотвора). Высказанная М. В. Ломоносовым критика теплорода долгое время не находила понимания; по-прежнему полагали, что степень нагретости тела определяется количеством содержащегося в нём теплорода. Отметим также флюид, «отвечавший» за оптические явления; световое излучение рассматривалось как распространение этого флюида по пространству. Наконец, в живых организмах предполагалось наличие особого флюида, называемого «жизненной силой».

Итак, естествознание вступило в XIX в. с *огромным багажом накопленных фактов и с целым рядом домыслов о природе этих фактов.* Эту ситуацию так охарактеризовал А. И. Герцен в своих «Письмах об изучении природы», написанных в 1845 г.: «Положительные науки имеют свои маленькие привиденьица: это — силы, отвлечённые от действий, свойства, принятые за самый предмет, и вообще разные кумиры, сотворённые из всякого понятия, которое ещё не понято: например, жизненная сила, эфир, теплотвор, электрическая материя и проч.» [34, с. 89]. Все эти придуманные флюиды («привиденьица») создавали лишь видимость понимания, кроме того, они как бы подчёркивали разрозненность рассматриваемых явлений, их обособленность друг от друга. «Возведением их в ранг субстанций, — отмечал А. Пуанкаре, — утверждалась их индивидуальность; они становились как бы разделёнными друг от друга глубокой пропастью. Эту пропасть потребовалось засыпать, когда стало живее чувствоваться единство природы, когда были замечены тесные внутренние связи между всеми её частями. Прежние физики размножением своих жидкостей не только создавали ненужные субстанции, но и разрывали реальные связи» [100, с. 107].

Осознание этих связей как раз и составило одну из главных задач науки XIX столетия.

О физиках и философах. Осмысление быстро накапливавшихся научных фактов нуждалось, казалось бы, в совместных действиях естествоиспытателей и философов. Однако со второй половины XVIII в. обнаружилось резкое *расхождение между философией и естествознанием*. Философия, возглавляемая И. Фихте (1762 – 1814), Ф. Шеллингом (1775 – 1854), Г. Гегелем (1770 – 1831), квалифицировала накопление экспериментальных данных как «малые дела»; себе же она отводила роль подлинного добывателя истины. Раскол между философией и естествознанием особенно углубился в XIX в. «Одна прорицала тайны с какой-то недосягаемой высоты, — писал А. И. Герцен, — другое смиренно покорялось опыту и не шло далее; друг к другу они питали ненависть; они выросли во взаимном недоверии; много предрассудков укоренилось с той и другой стороны; столько горьких слов пало, что при всём желании они не могут примириться до сих пор» [34, с. 89].

В чём же дело? Ведь в античные времена естествознание и философия представляли единое целое. Что же произошло впоследствии? То, что произошло, может быть названо болезнью роста. Как отмечал С. И. Вавилов, «с начала великого расцвета естествознания в XVI – XVII вв., по мере постепенного усложнения и обособления отдельных наук, физики всё больше и больше стали отдаляться от философских задач и даже стали культивировать пренебрежительное отношение к философии как схоластической, ненужной области знания. Грибоедовское «пофилософствуй — ум вскружится» стало лозунгом для очень многих физиков и естествоиспытателей вообще» [15, с. 21]. Здесь уместно вспомнить, что в XVII, а затем в XVIII и XIX вв. в науке укрепился и широко применялся *аналитический метод мышления*. Он был необычайно полезен, без него не произошло бы столь мощное накопление эмпирических данных. В то же время этот метод мышления страдал склонностью возводить получаемые данные в догматы, *разрывать* и *абсолютизировать* их, рас-

сматривать как истину в *окончательном* виде. Он, как подчёркивал Ф. Энгельс, «оставил нам вместе с тем и привычку рассматривать вещи и процессы природы в их обособленности, вне их великой общей связи, и в силу этого — не в движении, а в неподвижном состоянии, не как существенно изменчивые, а как вечно неизменные, не живыми, а мёртвыми. Перенесённый Бэконом и Локком из естествознания в философию, этот способ понимания создал специфическую ограниченность последних столетий — метафизический способ мышления» [2, с. 20 – 21].

И тут возникает необходимость внеочередного диалога между автором и учителем-читателем.

Учитель. Насколько же мощнее был бы прогресс науки в XVIII — XIX вв., если бы вместо раскола существовал союз физиков и философов, если бы, как и раньше, физика и философия действовали в рамках единой науки!

Автор. Всё далеко не так просто. Чтобы развиваться, физика должна была накопить побольше фактов, она должна была в определённом смысле «омертвить» действительность, разорвать (точнее говоря, не учитывать) многочисленные связи, исследовать многие детали действительности по отдельности.

Учитель. Значит, разрыв физики с философией был исторически оправдан?

Автор. На рассматриваемом этапе он был оправдан. Он пошёл на пользу как физике, так и философии. Физики, не задумываясь о глубинной сущности явлений (пока им было достаточно придуманных ими флюидов), *добывали факты и факты*. Философы же, отстранясь от фактов, *оттачивали диалектику мышления*.

Учитель. Но это же была *идеалистическая* диалектика!

Автор. Конечно, коль скоро она была оторвана от фактов, от действительности. Тем не менее философы развили диалектический метод, ценность которого велика отнюдь не только для идеалистов, но и для материалистов. Это подчёркивал В. И. Ленин в «Философских тетрадях». Он писал: «Я вообще стараюсь читать Гегеля материалистически: Гегель есть поставленный на голову материализм...» [5, с. 93]. И далее: «Итог и резюме, последнее слово и суть логики Гегеля есть *диалектический метод* — это крайне замечательно. И ещё одно: в этом *самом идеалистическом* произведении Гегеля *всего меньше* идеализма, *всего больше* материализма. “Противоречиво”, но факт!» [5, с. 215] I

Учитель. Итак, с одной стороны, *метафизический материализм физиков,* а с другой — *диалектический идеализм философов*. Таковы два самостоятельных направления в развитии науки XIX в.

Автор. Действительно, наблюдалась довольно чёткая расстановка сил. Полагаю, что в такой расстановке был глубокий смысл; в этом был залог перехода в дальнейшем к *диалектическому материализму.*

Учитель. Получается, что Вы положительно оцениваете разрыв между философией и физикой.

Автор. Дело, конечно, не в моей оценке. Важно понимать историческую необходимость такого временного (именно временного) разрыва. Ещё раз подчеркну: прежде чем рассматривать природу в её диалектическом единстве, необходимо было *проанализировать* её, разобрать всё на части. Метафизическое «омертвление» действительности, исследуемой аналитически, — необходимый предварительный этап на пути к пониманию диалектики природы.

Но, разумеется, не всё столь однозначно. Попробуйте, например, дать оценку деятельности И. Поггендорфа (1796 – 1877) — основателя и редактора весьма солидного физического научного журнала «Annalen der Physik». Этот журнал начал выходить с 1824 г.; он сыграл исключительную роль в развитии естествознания вообще и физики в особенности. Поггендорф очень бдительно следил за «чистотой стиля» журнала и категорически отказывался публиковать работы, где была хоть какая-то философия; признавались только эмпирические факты, а любые обобщения и гипотезы отвергались. Правильно ли это бы-

ло? С одной стороны, правильно, так как нацеливало учёных на экспериментальные исследования, ограждало читателей от различного рода домыслов. Но, с другой стороны, это неизбежно обедняло журнал, возводило барьер перед неординарными работами, где предпринимались попытки осмыслить накопленные факты. Например, гениальная работа Р. Майера, открывшего закон сохранения и превращения энергии, так и пролежала в редакции журнала до самой смерти его редактора. Не поэтому ли великий закон пришлось самостоятельно переоткрывать Д. Джоулю?

Так что воздержимся от категорических заключений. Тем более не будем гадать о том, как развивались бы события, если бы у физиков и философов XIX столетия было поменьше неприязни друг к другу. Подлинному союзу естествознания и философии ещё только предстояло родиться. Предвидение и самые основы этого будущего союза содержатся в трудах Карла Маркса (1818 – 1883) и Фридриха Энгельса (1820 – 1895). Необходимым предварительным шагом на пути к указанному союзу был начавшийся в XIX в. процесс *интеграции* разрозненных дотоле научных знаний. Одним из важнейших достижений этого процесса надо считать синтез классической электродинамики.

Синтез электродинамики. «Когда в декабре 1801 г. Алессандро Вольта впервые демонстрировал на торжественном собрании Французского института изобретённый им источник электрического тока, ни сам докладчик, ни присутствовавшие при этом крупнейшие французские учёные даже не подозревали о том, что главным направлением дальнейших исследований в этой области явится электромагнетизм. Впрочем, это новое направление проявило себя лишь двадцать лет спустя в потоке необычайных новых открытий, которые ещё через полстолетия повлекли за собой мощный технический переворот» [45, с. 27].

Первый важный шаг был сделан датским физиком Х. К. Эрстедом (1777 – 1851). Находясь под влиянием идей Шеллинга о единстве «всех сил природы», Эрстед полагал, что должна существовать связь между электрическими и магнитными явлениями. Эту связь ему удалось продемонстрировать в 1820 г. в опытах по воздействию электрического тока на магнитную стрелку. Опыты произвели на современников сильное впечатление; их немедленно повторили в Германии, Швейцарии, Франции.

В том же 1820 г. французский физик А. Ампер (1775 – 1836) выступил с сообщением о новом явлении — взаимодействии двух проводников, по которым течёт ток. В этом же сообщении Ампер впервые высказал мысль об электрической природе магнетизма. В течение очень короткого времени он выполнил ряд важных исследований, блестяще подтвердивших его мысль (позднее все полученные результаты были систематизированы Ампером в книге «Теория электродинамических явлений, выведенная исключительно из опыта», опубликованной в 1826 г.). Отныне с магнитными жидкостями было покончено, теперь в них не было необходимости. Магнитные явления, как оказалось, обусловлены электрическими токами. Магнит следовало рассматривать, исходя из совокупности круговых электрических токов, плоскости которых перпендикулярны к прямой, проведённой через полюса магнита. Спираль с током (соленоид) уподоблялась магниту. С полным правом Ампер мог заявить: «Таким образом, все магнитные явления я свёл к чисто электрическим действиям» [6, с. 411]. Разрабатывая основы электродинамики — нового направления, объединившего электричество и магнетизм, — учёный установил выражение для силы, с которой взаимодействуют два элемента тока; это выражение входит во все современные учебники электродинамики. В частности, он обратил внимание на то, что электродинамические силы, в отличие от известных в то время гравитационных и электростатических, не являются центральными.

В 20-х годах XIX в. проблемами электромагнетизма заинтересовался гениальный английский учёный-самоучка М. Фарадей (1791 – 1867). Эрстед и Ампер превратили электричество в магнетизм; Фарадей поставил перед собой задачу — превратить магнетизм в электричество. С 1831 г. он начал систематическую публикацию своих исследований, в

результате чего возник многотомный труд под общим названием «Экспериментальные исследования по электричеству». В первой серии этого труда (1831) описаны знаменитые опыты Фарадея, которые привели к открытию явления *электромагнитной индукции*. Фарадей показал, что изменение магнитного потока во времени порождает электродвижущую силу индукции, приводит к возникновению электрического тока в замкнутом контуре. Направление этого тока определяется правилом, которое; установил позднее (1834) молодой профессор Петербургского университета Э. Х. Ленц (1804 – 1865): «Если металлический проводник движется поблизости от гальванического тока или магнита, то в нём возбуждается гальванический ток такого направления, что если бы данный проводник был неподвижным, то ток мог бы обусловить его перемещение в противоположную сторону» [65, с. 148]. Во второй серии своих «Экспериментальных исследований» (1832) Фарадей продолжает изучение электромагнитной индукции. В третьей серии (январь 1833) он показывает, что разнообразие видов электричества является *кажущимся*. Изучая действия, производимые обыкновенным, вольтовым, «животным», термическим, магнитным электричеством, он приходит к выводу: «Все виды электричества идентичны по своей природе». Правда, сама эта природа не была ещё ясна в то время. Фарадей осторожно замечает на сей счёт: «Под током я подразумеваю нечто движущееся поступательно — всё равно, что при этом находится в движении: электрическая жидкость или две жидкости, движущиеся в противоположных направлениях...» [129, с. 118]. В июне 1833 г. выходит пятая серия «Экспериментальных исследований»; она посвящена *электролизу*. Здесь, а также в последующих трёх сериях Фарадей исследует *химические действия* электрического тока. Всего вышло двадцать серий. Отметим особо девятнадцатую серию (1846), где рассматривается открытое Фарадеем явление *вращения плоскости поляризации света* в намагниченной среде. «Таким образом, — заключает учёный, — впервые, как я полагаю, установлена подлинная непосредственная связь и зависимость между светом и магнитными и электрическими силами и тем самым сделано большое добавление к фактам и соображениям, служащим для доказательства того, что все естественные силы связаны друг с другом и имеют одно общее происхождение» [130, с. 35].

Фарадей отказался от ньютоновской концепции дальнодействия; он ввёл в физику совершенно новый объект — *физическое поле*. Согласно новой концепции воздействие одного тока на другой объясняется так: первый ток создаёт вокруг себя в пространстве магнитное поле, а это поле действует на находящийся в нём второй ток. Аналогично: второй ток создаёт своё магнитное поле, которое действует на первый ток. Каким представлялось в те времена поле? Об этом можно как-то судить, познакомившись, например, с письмом Д. К. Максвелла к М. Фарадею (1857): «Сейчас, насколько мне известно, Вы являетесь первым человеком, у которого возникла идея о том, что тела действуют друг на друга на расстоянии посредством обращения окружающей среды в состояние напряжения, идея, в которую действительно следует поверить. У нас были когда-то потоки крючочков, летающих вокруг магнитов, и даже картинки, на которых изображены окруженные ими магниты; но нет ничего более ясного, чем Ваше описание... Мне кажется, что Вы ясно видите, как силовые линии огибают препятствия, гонят всплески напряжения в проводниках, сворачивают вдоль определённых направлений в кристаллах и несут с собой всё то же самое количество способности к притяжению, распределённой разреженнее или гуще в зависимости от того, расширяются эти линии или сжимаются» [52, с. 163].

Полевые представления Фарадея очень заинтересовали Д. К. Максвелла (1831 – 1879). Он не только развил их, но и придал им математическую форму — так появились знаменитые *уравнения Максвелла*. Учёный изложил свою электромагнитную теорию в работах «О физических линиях силы» (1862) и «Динамическая теория поля» (1865). Известно, что Максвелл в чисто педагогических целях (ему хотелось более доходчиво объяснить свои уравнения) прибегал к искусственным механическим моделям для иллюстрации процессов, происходящих в электромагнитном поле. Следует иметь в виду, что он прекрасно понимал условность подобных представлений и всерьёз их не принимал. Исследования Мак-

свелла позволили сделать два весьма важных заключения. Первое: электромагнитное поле может распространяться в пространстве в виде *электромагнитной волны*. Второе: свет есть не что иное, как *электромагнитные волны в определённом диапазоне частот*. В конце 80-х годов XIX в. Г. Герц (1857 – 1894) экспериментально доказал существование электромагнитных волн.

Одно из главных достижений естествознания XIX в. — существенный прогресс в понимании *электрических, магнитных* и *оптических* явлений. Рассматриваемые в начале века порознь они предстали в конце века *в едином комплексе*. Превращение электричества в магнетизм, а затем магнетизма в электричество означало фактически объединение электричества и магнетизма; была создана единая теория электрических и магнитных явлений — *теория электромагнитного поля.* Появилось качественно новое физическое понятие — поле, стала формироваться *электромагнитная картина мира,* которой предстояло сменить механическую картину. Процесс интеграции физического знания не ограничился объединением электричества и магнетизма в рамках теории электромагнитного поля; была установлена электромагнитная природа света, что фактически означало включение оптики в электромагнетизм.

Один за другим стали сходить со сцены различные флюиды. Первым сошёл световой флюид; уже в первой половине XIX в. теория «истечения» в оптике была полностью вытеснена волновой оптикой Т. Юнга (1773 – 1829) и О. Френеля (1788 – 1827). Вначале это были световые волны, распространяющиеся в некоем эфире, имеющем механическую природу; к концу века они были заменены электромагнитными волнами. Исследования А. Ампера заставили отказаться от магнитных флюидов. Дольше всех сохранялись представления об электрических флюидах, но и они потерпели крах на исходе века (после открытия электрона).

Исследования в области электромагнетизма предопределили целый ряд серьёзных технических изобретений. Уже в первой половине века был изобретён электрический телеграф. Электродвигатель Б. С. Якоби в 1839 г. приводил в движение небольшое речное судно. На смену химическим источникам тока в 60-х годах пришли электрогенераторы. Широкое применение получил созданный З. Граммом в 1869 г. генератор с самовозбуждением. В 70-х годах появились электроосветители: «свеча Яблочкова» (1876), лампа накаливания Т. Эдисона (1879). Начиная с 80-х годов генераторы и электродвигатели постоянного тока стали постепенно вытесняться генераторами и электродвигателями переменного тока. Исследования А. С. Попова в 1895 г. (а затем Г. Маркони) возвестили о рождении радио.

Развитие термодинамики; открытие закона сохранения и превращения энергии. В XVIII в. были изобретены паровые насосы, а затем и паровые машины. В начале XIX в. появились пароходы, началось строительство железных дорог. Широкое применение пара выдвигало на передний план исследования тепловых явлений, поиск путей повышения эффективности паровых машин. Возникла и стала быстро развиваться *термодинамика*. Процесс её развития был фактически процессом интеграции знаний. Если в начале века только что родившаяся термодинамика выступала как механическая теория теплоты, то на склоне века она представляла собой весьма *общую* теорию, выходящую за рамки собственно тепловых явлений, приложимую ко всем физическим и химическим процессам, происходящим в веществе, в различных системах. Важным достижением на пути этого процесса интеграции знаний было открытие фундаментального закона природы — *закона сохранения и превращения энергии*.

Приговор теплороду был вынесен, по сути дела, уже в самом конце XVIII в., когда Б. Румфорд (1753 – 1814) продемонстрировал закипание воды в сосуде, где производилось сверление канала в металлическом цилиндре. В этом опыте наблюдалось нагревание вследствие трения; работа по сверлению канала превращалась здесь в теплоту. Несмотря на это идея теплорода просуществовала ещё несколько десятилетий. Любопытно, что основатель термодинамики С. Карно (1796 – 1832) в своём главном труде «Размышления о

движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу» (1824) ещё пользовался понятием теплорода. Позднее Карно отказывается от теплорода; он пишет: «Тепло — это не что иное, как движущая сила, или, вернее, движение, изменившее свой вид. Это движение частиц тел. Повсюду, где происходит уничтожение движущей силы, возникает одновременно теплота в количестве, точно пропорциональном количеству исчезнувшей движущей силы. Обратно, всегда при исчезновении теплоты возникает движущая сила. Таким образом, можно высказать общее положение: движущая сила существует в природе в неизменном количестве, она никогда не создаётся, никогда не уничтожается; в действительности она меняет форму, т. е. вызывает то один род движения, то другой...» [71, с. 231]. Нетрудно усмотреть здесь закон сохранения и превращения энергии — достаточно вместо «движущей силы» поставить «энергию» (заметим, что термин «энергия» был введен Юнгом ещё в 1807 г., но прижился не сразу; под «энергией» Юнг понимал произведение массы тела на квадрат его скорости).

Открытие закона сохранения и превращения энергии обычно связывают с именами Р. Майера (1814 – 1878), Д. Джоуля (1818 – 1889), Г. Гельмгольца (1821 – 1894). Никто из них не был профессиональным физиком. Майер и Гельмгольц были по образованию врачами, Джоуль был инженером, в прошлом пивоваром. К открытию они шли разными путями.

Майер шёл от медицинских наблюдений. «Летом 1840 г., пуская кровь на Яве новоприбывшим европейцам, — писал он, — я сделал наблюдение, что взятая из плечевой вены кровь имеет почти всегда поразительно яркую красную окраску (обычно венозная кровь очень тёмная. — *Авт.*). Это явление приковало моё внимание. Исходя из теории Лавуазье, согласно которой животная теплота есть результат процесса горения, я рассматривал двоякое изменение окраски, испытываемое кровью в капиллярах малого и большого круга кровообращения, как видимое следствие происходящего в крови окисления. Для поддержания температуры человеческого тела образование теплоты в нём должно находиться в некотором количественном отношении к потере им теплоты, а значит, также к температуре среды; поэтому как образование теплоты в процессе окисления, так и разность окраски обоих видов крови должна быть в общем в жарком поясе слабее, чем в более холодных странах» [45, с. 83]. Обратим внимание на то, что «образование теплоты» в организме, происходящее в процессе окисления, должно быть определённым образом сбалансировано с «потерей теплоты» организмом. Фактически Майер исключал из игры ещё один флюид — жизненную силу. Физиологические процессы обусловливаются не таинственной жизненной силой, а физико-химическими процессами, подчиняющимися закону сохранения и превращения энергии. Свои наблюдения, идеи, выводы Майер изложил в работе «О количественном и качественном определении сил» (под «силой» здесь надо понимать энергию). В 1841 г. он направил эту работу в «Анналы» Поггендорфа; как мы уже говорили, работа пролежала в столе редактора до самой его смерти. Через несколько лет учёный изложил свои идеи в брошюре, которую выпустил за свой счёт. Майер рассматривал различные виды энергии: *кинетическую* («живая сила движения»), *потенциальную* («сила падения»), их сумму — *механическую* энергию («механический эффект»), а также *тепловую, электрическую, химическую* энергии («силы»); он считал, что все эти виды могут взаимопревращаться — при условии неизменности общего количества энергии. Он полагал, что жизнь на Земле, круговорот воды, движение воздушных масс — всё это обеспечивается, в конечном счёте, энергией солнечных лучей. Он писал: «Природа поставила перед собой задачу поймать на лету льющийся на Землю свет и накопить самую подвижную силу, приведя её в неподвижное состояние. Для достижения этой цели она покрыла земную кору организмами, которые, живя, поглощают солнечный свет и при использовании этой силы порождают непрерывно возобновляющуюся сумму химических различий. Этими организмами являются растения» [59, с. 205].

Джоуль шёл к великому открытию иным путем. Он вначале заинтересовался выделением тепла в проводнике, по которому течёт электрический ток (напомним закон Джоуля

— Ленца). Это побудило его заняться изучением связи между теплотой и работой. В статье «О тепловом эффекте магнитоэлектричества и механическом эффекте теплоты» (1843) он делает вывод: «... Во всех случаях, когда затрачивается механическая сила (надо читать «механическая работа» — *Авт.*), получается точное эквивалентное количество теплоты» [59, с. 208]. Два года спустя Джоуль выполняет достаточно точные измерения механического эквивалента теплоты.

Гельмгольц, как и Майер, пришёл к выводу о сохранении энергии, рассматривая физиологические тепловые явления (1847). С учётом современной терминологии его формулировка закона сохранения энергии выглядит так: *приращение кинетической энергии тела равно убыли его потенциальной энергии.* Гельмгольц выразил полученный закон в математической форме. Заметим также, что в отличие от предшественников он связал закон сохранения энергии с принципом невозможности создания вечного двигателя.

С открытием закона сохранения и превращения энергии термодинамика выходит за рамки теории процессов, происходящих в тепловых машинах. Приобретает глубокий и общий смысл *первое начало термодинамики*: любая система может обмениваться энергией с окружающей средой несколькими способами (как говорят, по нескольким каналам), из которых наиболее важны два — через *теплопередачу* и через *совершение работы*; изменение внутренней энергии системы определяется *балансом энергий*, полученных (отданных) системой по всем каналам. *Направление* передачи энергии по тому или иному каналу (к системе или от системы) в каждом конкретном случае регулируется *вторым началом термодинамики.* Это начало как некое эмпирическое правило было впервые сформулировано в 1850 г. Р. Клаузиусом (1822 – 1888) и в 1851 г. У. Томпсоном (1824 – 1907). Клаузиус ввёл понятие внутренней энергии, он же ввёл величину, названную им «энтропией». На современном научном языке второе начало термодинамики звучит так: *если система замкнутая, то её энтропия со временем не убывает*. Недаром второе начало называют часто *законом возрастания энтропии*.

По мере своего развития термодинамика превращалась в стройную феноменологическую теорию, описывающую в самом общем виде *энергетические процессы в любых системах*; понятия, принципы, методы термодинамики оказались поистине всеобъемлющими. Именно такой предстаёт перед нами термодинамика после блестящих работ Д. Гиббса (1839 – 1903), в которых был развит метод термодинамических функций, сформулированы условия термодинамического равновесия, получен наиболее общий вид для функции распределения.

Успехи термодинамики приводили, как это не раз случалось *в* науке, к абсолютизации достигнутого уровня понимания природы. Так, они привели к появлению так называемой *энергетической концепции*. Энергетики (выделим среди них В. Оствальда (1853 – 1932)) считали, что всё сводится к энергии, что кроме превращений энергии в мире ничего не совершается. В частности, они отвергали атомы и молекулы. А между тем именно на пути развития атомистики получили физическое объяснение многие понятия термодинамики, была понята физическая природа второго начала термодинамики.

Успехи атомистики. Как уже говорилось, атомистическая концепция стала возрождаться в XVII — XVIII вв. В XIX в. она получила дальнейшее развитие. Это развитие шло в двух направлениях. Первое было связано с изучением коллективов молекул — без выяснения того, что представляют собой сами молекулы (атомы). Важной вехой на этом пути явился закон, который в 1811 г. установил А. Авогадро (1776 – 1856): в равных объёмах газов при одинаковых температурах и одинаковых давлениях содержится одинаковое количество молекул. В 1857 г. в «Анналах» Поггендорфа появилась статья Клаузиуса «О роде движения, который мы называем теплотой», где были изложены основы *кинетической теории газа.* Рассматривая тепловое движение молекул, Клаузиус учитывает не только поступательное и вращательное движения молекул, но и колебания атомов в молекуле. Он устанавливает основное уравнение кинетической теории газов: давление равно двум третям средней кинетической энергии молекул, помноженной на число молекул в единице

объема. Клаузиус вводит понятие «идеальный газ»; он определяет его как газ, у которого, «во-первых, молекулы настолько малы, что их объёмом можно пренебречь по сравнению с объёмом, занимаемым всем газом, и, во-вторых, молекулы проявляют силы взаимодействия, лишь находясь в непосредственной близости друг от друга» [59, с. 233]. (Современное, более общее определение «идеального газа»: газ, у которого энергия взаимодействия молекул пренебрежимо мала по сравнению с их кинетической энергией. Или ещё более обще: газ, полная энергия которого есть сумма энергий составляющих его частиц.) Заметим, что движение самих молекул газа Клаузиус рассматривает в соответствии с законами классической механики: от столкновения до столкновения молекулы движутся равномерно и прямолинейно.

Осознание того факта, что в целом коллектив молекул должен подчиняться *вероятностным (статистическим)* закономерностям, является, без сомнения, наиболее важным достижением атомистики XIX столетия. В 1859 г. Д. К. Максвелл получает первую в физике *функцию распределения*, описывающую вероятность молекулам иметь то или иное значение скорости (точнее говоря, не вероятность, а плотность вероятности), — знаменитое *распределение Максвелла*. Так в физике появляется вероятность; до этого ею интересовались только математики. Как и Клаузиус, Максвелл считает, что каждая молекула движется в соответствии с законами Ньютона. Идеи Максвелла получают дальнейшее развитие в работах Л. Больцмана (1844 – 1906). Больцман обобщил максвелловский закон распределения, рассмотрев газ во внешнем поле. Он применил статистический метод к термодинамике, дал *статистическое обоснование второго начала, выразил энтропию через вероятность* (знаменитая *формула Больцмана*). Эти свои идеи он изложил в статье «О связи второго начала механической теории теплоты с исчислением вероятностей» (1877). Так родилась статистическая физика. Она станет идеологической основой физики XX столетия. Но в то время вряд ли кто догадывался об этом. В формировавшейся в конце XIX в. электромагнитной картине мира не было места статистическим (вероятностным) представлениям.

Второе направление атомистики XIX в. связано с выяснением *самой природы* молекул и атомов. Первый шаг в этом направлении сделали химики; по сути дела, это был первый шаг на пути интеграции физических и химических знаний. В 1815 г. У. Праут выдвинул гипотезу, согласно которой все атомы построены из атомов водорода. Особое место занимает открытие в 1869 г. Д. И. Менделеевым (1834 – 1907) фундаментального закона — *Периодической системы химических элементов*. В то время было известно 63 элемента. Пользуясь своей системой, Менделеев предсказал ряд новых элементов, описал их свойства. Так, были предсказаны открытый в 1879 г. скандий (Менделеев называл этот элемент экабором), открытый в 1875 г. галлий (экаалюминий), открытый в 1886 г. германий (экакремний). За десять лет до создания Периодической системы элементов было сделано ещё одно очень важное открытие: физик Г. Кирхгоф (1824 – 1887) и химик Р. Бунзен (1811 – 1899) открыли *спектральный анализ* — мощное средство исследования вещества. Эти два открытия (спектральный анализ и Периодическая система элементов) заставили осознать сложность структуры атома. Стало ясно, что атом имеет *составные части*, движение которых и порождает характерные *спектры*.

Для понимания структуры атома важную роль сыграло *открытие электрона*. Сам термин «электрон» был предложен ирландским физиком Д. Стони в 1891 г. для заряда одновалентного иона. Собственно электрон был открыт Дж. Дж. Томсоном (1856 – 1940) в 1897 г. Открытие состоялось при исследовании свойств катодных лучей. Изучая отклонение катодных лучей в электрическом и магнитном полях, Томсон измерил отношение заряда к массе для образующих эти лучи частиц (электронов). В 1903 г. Томсон предложил модель атома в виде положительно заряженной по объёму сферы диаметром около 10^{-10} *м*, внутрь которой «вкраплены» электроны (что-то вроде пудинга с изюмом). Когда электроны колеблются относительно центра сферы, атом излучает свет. Выполненные Резерфордом (1871 – 1937) в 1908 – 1911 гг. эксперименты по рассеянию альфа-частиц ме-

таллической фольгой убедительно показали, что почти вся масса атома сосредоточена в исключительно малом объёме — *атомном ядре*; его диаметр примерно в 10 000 раз меньше диаметра атома. Опыты Резерфорда послужили основой для создания *ядерной модели атома*, которая и выражает наши сегодняшние представления об устройстве атома. В центре атома находится атомное ядро, а весь остальной объём атома предоставлен электронам.

Электромагнитная картина мира. Эта картина мира формировалась во второй половине XIX в. на основе исследований в области электромагнетизма (решающую роль сыграли исследования, выполненные М. Фарадеем и Д. К. Максвеллом, позволившие ввести понятие физического поля). В процессе этого формирования на смену механической модели эфира пришла электромагнитная модель; электрическое, магнитное, электромагнитное поля трактовались первоначально как разные «состояния» эфира. Позднее, уже в начале XX в. необходимость в эфире отпала; пришло понимание того, что электромагнитное поле само есть определённый вид материи, так что для распространения его не требуется какая-то особая «среда» (эфир).

Электромагнитная картина мира формировалась не только в XIX в.; она продолжала формироваться в течение трёх десятилетий XX в. Поэтому она использовала не только учение об электромагнетизме и достижения атомистики, но также некоторые идеи современной физики (идеи теории относительности и квантовой механики). Итак, рассмотрим основные черты электромагнитной картины мира, сложившейся в первой четверти нашего столетия.

Согласно этой картине материя существует в двух видах — в виде *вещества* и в виде *поля*, причём между указанными видами имеется *непереходимая грань*: вещество не превращается в поле, поле не превращается в вещество. Известны два типа полей — *электромагнитное* и *гравитационное*. Соответственно есть два фундаментальных взаимодействия. Электромагнитное взаимодействие объясняет не только электрические и магнитные явления, но и многие другие явления — оптические, тепловые, химические. Если в XVIII в. стремились свести всё к механике, то теперь всё, включая и ряд механических явлений (например, трение, упругость), стремятся *свести к электромагнетизму*. Вне сферы господства электромагнетизма остаётся, по сути дела, только тяготение.

В качестве элементарных «кирпичиков», из которых построена вся материя, рассматриваются всего три частицы — *электрон, протон* и *фотон.* Фотоны — «кирпичики» («зёрна», кванты) электромагнитного поля. *Корпускулярно-волновой дуализм* (о нём уже говорят физики) «примиряет» волновую природу поля с корпускулярной; иными словами, при рассмотрении электромагнитного поля используются, наряду с волновыми, также корпускулярные (фотонные) представления. Исследуя проблемы теплового излучения и фотоэффекта, Альберт Эйнштейн в самом начале нашего столетия пришёл к выводу о квантовании энергии светового излучения, а в 1916 г. он ввёл в рассмотрение *порции* самого излучения *(световые кванты)*, обладающие не только определённой энергией, но и определённым импульсом. С 1926 г. световые кванты Эйнштейна стали называть *фотонами.*

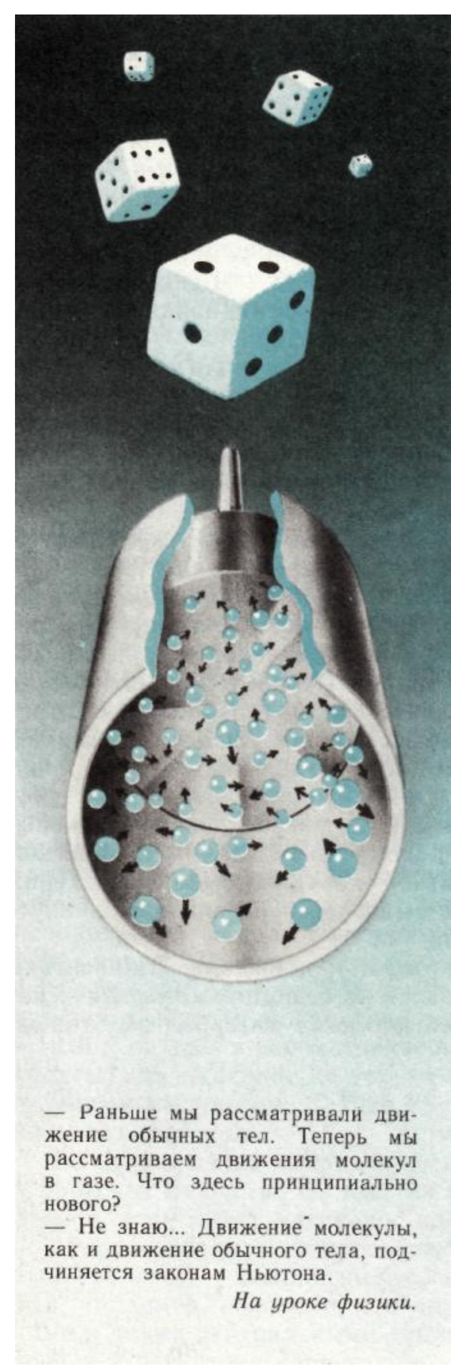
Элементарными «кирпичиками» вещества являются электроны и протоны. Вещество состоит из молекул, молекулы образованы из атомов, атом имеет массивное ядро и электронную оболочку. Атомное ядро «собрано» из протонов и (как тогда считали) своеобразных *дублетов* — компактных соединений из протона и электрона. Так, например, полагали, что ядро гелия образовано двумя протонами и двумя нейтральными дублетами, т. е. содержит в себе 4 протона и 2 электрона. При таком взгляде на структуру вещества все силы, действующие в веществе, сводились к электромагнитным — в полном соответствии с идеологией электромагнитной картины мира. Эти силы отвечают за межмолекулярные связи и за связи между атомами в молекуле; они же удерживают электроны атомной оболочки вблизи ядра; более того, эти же силы обеспечивают прочность атомного ядра. И электрон, и протон — стабильные частицы, поэтому должны быть стабильными атомы и

атомные ядра. Казалось бы, такую картину устройства материи можно было считать вполне безупречной. Однако были «мелочи», в рамки картины не укладывающиеся, например радиоактивность. Довольно скоро стало ясно, что подобные «мелочи» весьма принципиальны — они привели к краху электромагнитной картины мира.

Конечно, электромагнитная картина представляла собой значительный шаг вперёд в познании человеком окружающего мира (по сравнению с механической картиной). Многие детали электромагнитной картины сохранились в современной естественнонаучной картине: понятие физического поля, электромагнитная природа сил, отвечающих за различные явления в веществе (но не в самих атомных ядрах!), ядерная модель атома, дуализм корпускулярных и волновых свойств и многое другое. В то же время в электромагнитной картине, как и в механической, господствовали *однозначные* причинно-следственные связи, по-прежнему всё было жёстко определено. Открытые Максвеллом и Больцманом вероятностные физические закономерности не признавались фундаментальными; поэтому они не включались ни в механическую, ни (позднее) в электромагнитную картину мира. Эти вероятности относились к коллективам молекул, а сами молекулы (каждая в отдельности) всё равно следовали однозначным ньютоновским законам. Столь же однозначными, жёсткими представлялись и максвелловские законы, управляющие электромагнитным полем. Как и для механической картины мира, для электромагнитной картины была характерна *метафизическая омертвелость*, всё было чётко разграничено, внутренние противоречия отсутствовали.

Девятнадцатый век подвёл человека к пониманию диалектики природы, но сам этот век ещё оставался на позициях *метафизического материализма*. Переход к диалектическому материализму только предстоял.

Диалог. О привычке видеть за вероятностями однозначные закономерности



— Раньше мы рассматривали движение обычных тел. Теперь мы рассматриваем движения молекул в газе. Что здесь принципиально нового?
— Не знаю... Движение молекулы, как и движение обычного тела, подчиняется законам Ньютона.

На уроке физики.

Автор. С точки зрения развития физики XIX в. с полным основанием может быть назван удивительным. Именно в этом веке начался и стал набирать мощь процесс интеграции физических знаний, увенчавшийся появлением теории электромагнитного поля, открытием закона сохранения и превращения энергии, созданием термодинамики, объединением усилий физики и химии в расшифровке строения атома. Именно в этом веке произошло событие, значение которого было понято много позднее — уже в XX в. Я имею в виду *обращение физиков к вероятностям*. Со времён Галилея и Ньютона физики признавали только однозначные закономерности; предполагалось, что иных причинно-следственных связей и быть не может. Теперь же, наряду с однозначными закономерностями (их принято называть *динамическими*) стали рассматриваться вероятностные *(статистические)* закономерности.

Интересно, обращаете ли Вы внимание школьников на этот принципиальный факт, когда знакомите их с молекулярно-кинетическими представлениями?

Учитель. Я говорю им, что при рассмотрении коллектива из большого числа молекул приходится пользоваться вероятностным описанием. Но, признаться, я не вижу здесь чего-либо принципиально нового. В конечное счёте, всё можно свести к законам Ньютона. Предположим, что в какой-то момент времени мы определили координаты и скорости *всех молекул* в рассматриваемом объёме газа. Предположим также, что мы сумели проследить за всеми соударениями молекул друг с другом и со стенками сосуда. Ясно, что в таком случае мы могли бы точно предсказать, где окажется в некоторый момент времени та или иная молекула, и какую скорость она будет при этом иметь.

Автор. Вас не смущает, что при этом Вы уподобляетесь тому самому всезнающему сверхсуществу, о котором писал Лаплас?

Учитель. Передо мной конкретная задача из механики. Правда, с чрезвычайно большим количеством тел.

Автор. В кубическом сантиметре газа при нормальных условиях находится около 10^{19} молекул. Вам пришлось бы иметь дело с фантастически сложной задачей.

Учитель. Трудности, конечно, исключительно огромны. Но они имеют не принципиальный, а чисто технический характер. И поскольку наши вычислительные возможности не беспредельны, приходится прибегать к вероятностям — вероятности молекуле попасть в такой-то объём, иметь скорость в таком-то интервале значений и т. д.

Автор. Значит, Вы полагаете, что использование вероятностей связано лишь с практической невыполнимостью чересчур громоздких расчётов и что *за этими вероятностями стоят однозначные закономерности*, управляющие поведением отдельных молекул?

Учитель. Именно так я и полагаю. Потому и не вижу здесь чего-то принципиально нового.

Автор. У меня есть, по крайней мере, четыре серьёзных аргумента в пользу того, что вероятностное описание больших коллективов необходимо по принципиальным, а не по техническим соображениям, что в *самой природе* этих коллективов есть случайность, что указанную случайность *нельзя свести к неполноте наших знаний* и неумениям выполнять столь громоздкие расчёты.

Учитель. Хотелось бы узнать эти аргументы.

Автор. Вот первый. Допустим, что существует, как Вы утверждаете, жёсткая система однозначных связей между молекулами в газе. Представим, что вдруг произойдёт исчезновение какого-то числа молекул (они попросту вылетят из сосуда). Значит, вместе с этими молекулами исчезнут и все предопределённые их присутствием в газе последующие столкновения с другими молекулами, что, в свою очередь, изменит поведение этих других молекул. Всё это не может не сказаться на всей системе жёстких взаимосвязей и, как следствие, на поведении коллектива молекул в целом. Однако известно, что можно совершенно безболезненно с точки зрения газа, рассматриваемого как целое, изъять сразу довольно большое число молекул (например, 10^{12} молекул и даже существенно больше). При этом параметры газа, его поведение нисколько не изменятся. Разве это не указывает на то, что динамические закономерности, управляющие поведением отдельных молекул, строго говоря, не определяют поведение газа в целом? Разве не обесценивается заранее наше желание проследить за изменением со временем координат и скоростей отдельных молекул?

Учитель. И всё же трудно поверить в то, что за поведением газа как целого не прячутся те самые законы, которые управляют поведением отдельных молекул газа.

Автор. Рассмотрим второй мой аргумент. Начну с простого примера. Камень бросают из некоторой точки под некоторым углом к горизонту с некоторой начальной скоростью. Пусть в какой-то точке его траектории мы мысленно изменили направление скорости камня на противоположное. Ясно, что камень возвратится в исходную точку и будет иметь в ней ту же скорость (по модулю), какую имел в момент бросания. Получается, что летящий камень как бы «помнит» всё время свою «историю».

Учитель. Это естественно — ведь каждое мгновенное состояние летящего камня предопределено предыдущим и, в свою очередь, определяет последующее.

Автор. Любую траекторию можно, в принципе, обратить и тем самым как бы возвратиться в прошлое. В этом и проявляются жёсткие (динамические) закономерности.

Иное дело — поведение газа. Представьте себе следующую ситуацию. Имеется пучок молекул, скорости которых параллельны. Этот пучок направлен в сосуд. Попадая в сосуд, молекулы испытывают множество столкновений, в результате газ, образуемый рассматриваемыми молекулами, приходит через некоторое время в состояние термодинамического равновесия. В этом состоянии утрачена какая-либо «память» о прошлом. Можно сказать, что пришедший в тепловое равновесие газ как бы «забыл» свою предысторию, не помнит, каким именно образом он пришёл в равновесное состояние. Поэтому нет смысла говорить о том, чтобы обратить всю ситуацию, — молекулы газа всё равно не соберутся в единый пучок, выходящий из сосуда в определённом направлении. Можно привести много примеров подобной «забывчивости». Предположим, что по одну сторону перегородки в сосуде находится один газ, а по другую сторону другой. Если убрать перегородку, произойдёт перемешивание молекул обоих газов. Вполне понятно, что не следует пробовать обратить эту картину — молекулы не распределятся по «своим» половинам сосуда. Газ, в котором произошло перемешивание, уже «забыл» свою предысторию.

Учитель. В этом я с Вами согласен.

Автор. А теперь поставим вопрос: когда происходит «утрата предыстории»? Это про-

исходит тогда, когда на сцене появляется *случайность*. Вот Вы подбрасываете игральный кубик — выпадает, допустим, тройка. Вы снова подбрасываете — выпадает пятёрка. Выпадение пятёрки никак не связано с тем, что перед этим выпала тройка. Вы бросаете кубик много раз и получаете некий набор цифр. В нём обнаруживается закономерность: пятёрка (как, впрочем, и любая из шести цифр) встречается примерно в одной шестой всех случаев. Эта закономерность *не имеет предыстории* — она не связана с выпадением тех или иных цифр при отдельных бросаниях кубика. Вы можете повторить опыт, произвести новую серию бросаний — получится новый набор цифр; однако упомянутая закономерность снова будет наблюдаться.

Утрата предыстории говорит о том, что здесь (и в случае с кубиком, и в случае с газом) мы имеем дело, в отличие от механики, с закономерностями иного типа — статистическими (вероятностными). Здесь случайность играет *принципиальную роль*, и поэтому не надо пытаться сводить эти закономерности к динамическим.

Учитель. Казалось бы, всё было так ясно. Сначала мы изучаем механику Ньютона, объясняющую движение обычных тел. Затем, применяя эту механику к движениям молекул газа, мы можем, в принципе, рассмотреть этот газ, можем, например, выразить на языке механики его температуру и давление. И температура, и давление газа имеют механические аналоги — среднюю энергию и усреднённое изменение импульса. Всё это позволяло относиться к динамическим закономерностям как к закономерностям фундаментальным. Вы же предлагаете поставить наравне с динамическими также вероятностные закономерности.

Автор. Между прочим, не все термодинамические величины имеют аналоги в механике. У *энтропии,* например, нет механического аналога — это как раз и есть мой третий аргумент.

Учитель. Энтропию в школе не проходят.

Автор. И наконец, четвёртый аргумент... До сих пор мы подразумевали, что движение отдельной молекулы можно описывать законами механики. Но, строго говоря, это неверно. Строго говоря, нельзя полагать, что молекула имеет одновременно определённые координаты и определённые составляющие скорости. А это означает, что траектория молекулы — понятие приблизительное. Молекула — *микрообъект* и как таковой движется по законам не ньютоновской, а *квантовой механики*. А эти законы являются вероятностными.

Учитель. Квантовую механику в школе тоже не проходят.

Автор. Да, школьников не знакомят ни с энтропией, ни с квантовой механикой. Их словно оберегают от всего, что принципиально связано с вероятностями. Неудивительно, что *возникла привычка в любом случае искать за вероятностями однозначные (динамические) закономерности*. Эта привычка органически связана с привычкой мыслить *механистически*, с привычкой основывать всё на представлениях и законах механики. А между тем представление о фундаментальности динамических закономерностей, равно как и механистический подход к законам природы — это *вчерашний* день науки. Вероятностные закономерности управляют не только коллективами, они могут определять поведение также отдельных членов коллектива, а именно: одной молекулы, одного атома, одного электрона.

Учитель. Последнее мне непонятно.

Автор. Приведу примеры. Находясь вне атомного ядра, нейтрон обнаруживает нестабильность: он *самопроизвольно* превращается в три частицы — протон, электрон и электронное антинейтрино. Это превращение (его называют распадом нейтрона) имеет *вероятностный* характер. Мы не можем предсказать, когда именно произойдёт распад конкретного, наугад выбранного нейтрона; мы можем говорить лишь о вероятности нейтрону прожить до распада то или иное время *t*. Эта вероятность равна $e^{-t/\tau}$, где $\tau = 10^3$ c; любопытно, что она не зависит от того, сколько уже «прожил» данный нейтрон к моменту начала отсчёта времени — нейтроны «не стареют». Постоянную τ называют временем жиз-

ни нейтрона. Важно понимать, что это название условно, так как действительное время жизни конкретного нейтрона может быть, в принципе, каким угодно. Просто это есть промежуток времени, в течение которого число уцелевших (нераспавшихся) нейтронов уменьшается в $e = 2,72$ раза. Другой пример: явление нестабильности некоторых атомных ядер (явление радиоактивности). Ещё один пример: самопроизвольный переход (скачок) атома из возбуждённого состояния в невозбуждённое. Все эти и многие другие примеры демонстрируют принципиальное обстоятельство: *поведение отдельного микрообъекта описывается не динамическими, а вероятностными закономерностями*. Так что именно вероятностные, а не динамические закономерности оказываются *фундаментальными*.

Учитель. Надо ли усложнять школьную программу по физике всеми этими «тонкостями»?

Автор. Может быть, и не надо. Но в таком случае не надо призывать учителя физики формировать у учащихся диалектическое мышление. Потому что именно вероятность выражает *диалектику необходимого и случайного*. Ограничиваясь рассмотрением лишь однозначных (динамических) закономерностей, Вы *разрушаете* упомянутую диалектику — Вы оставляете необходимость и выкидываете случайность. Диалектике нельзя научить с помощью одних только призывов и деклараций.

Учитель. Конечно, Ваш довод, касающийся диалектики необходимого и случайного, убедителен. Однако вернёмся к Вашим примерам и попробуем взглянуть на них немного иначе. Не слишком ли много случайного? Совершенно случайно, без воздействия извне нейтрон вдруг превращается в три новые частицы. Какое-нибудь атомное ядро пребывает в покое много лет и вдруг ни с того ни с сего взрывается, превращаясь в новое ядро. Не означает ли всё это, что в явлениях микромира фактически *отсутствует причинность*?

Автор. Вы затронули крайне важный вопрос. Действительно, объективная случайность (случайность, присутствующая в самой «природе вещей», а не связанная с нашим незнанием каких-то деталей) представляется, на первый взгляд, как отказ от принципа причинности. Но это не так. Как Вы думаете, тот факт, что при последовательных бросаниях игрального кубика выпали, скажем, двойка, пятёрка, единица, — это объективно случайные события или нет?

Учитель. Каждое выпадение цифры имеет свои причины: начальное положение кубика в руке, взмах кисти, толчок, сопротивление воздуха, расстояние от руки до пола (до стола) и т. д.

Автор. Верно. И тем не менее, эти события — объективно случайные. Всё дело в том, что *между ними нет корреляции*. Выпадение данной цифры не зависит от того, какая цифра выпала перед этим, и не влияет на то, какая цифра выпадет при последующем бросании. Вспомним: случайность связана с отсутствием «памяти», *утратой предыстории*, иначе говоря, с *некоррелированностью событий*.

Учитель. Я не совсем понимаю Ваши рассуждения.

Автор. Приведу другой пример. Рассмотрим события — заказы такси по телефону. За каждым конкретным заказом стоит целая цепь причин. Для диспетчера таксомоторного парка поступающие к нему заказы — объективно случайные события. Причём вовсе не потому, что он не знает упомянутой цепи причин, а вследствие совершенно объективного обстоятельства — отсутствия взаимной согласованности в действиях людей, которые делают заказ. Тут события рассматриваются как бы в двух разных плоскостях. В одной они объективно случайны, в другой — каждое из них имеет определённые причины. Как видите, объективная случайность прекрасно уживается с причинностью.

Учитель. Ваши примеры взяты из жизни. А как быть с явлениями в микромире? Пусть распад нейтрона объективно случаен в какой-то «плоскости». А в какой «плоскости» надо искать его причины?

Автор. Распад нейтрона действительно объективно случаен. Мы принципиально (а не потому, что чего-то не знаем) не можем управлять длительностью «жизни» конкретного нейтрона. Нет у нейтрона и своеобразных «внутренних часов». Как уже отмечалось, ней-

троны «не стареют»: вероятность нейтрону прожить какое-то время не зависит от того, сколько он уже прожил. В то же время распад нейтрона (как и любое событие в мире) не есть беспричинное событие. В этом смысле термин «самопроизвольный распад» неточен. Строго говоря, самопроизвольно может вести себя лишь *полностью изолированный* объект. Однако любой *микрообъект* — не изолированный объект, он взаимодействует со всем миром. Сама сущность микрообъекта реализуется в том или ином виде в зависимости от конкретных условий, от того, в какой именно обстановке находится данный микрообъект (зависит от того, как поставлен эксперимент с микрообъектом).

Учитель. По-моему, нейтрон всегда есть нейтрон, а электрон всегда есть электрон.

Автор. Конечно. Но разве Вы не знаете, что электрон может обнаруживать волновые либо корпускулярные свойства в зависимости от конкретных условий, например условий эксперимента, который мы проводим с электронами?

Учитель. Да, мне это известно. Но можно ли это рассматривать как взаимодействие электрона со всем окружающим его миром?

Автор. Термин «взаимодействие» надо понимать здесь шире, чем это понимается при рассмотрении обычных (силовых) взаимодействий. Это есть один из принципиальных вопросов, рассматриваемых в квантовой механике. Коль скоро в зависимости от условий электрон или нейтрон обнаруживают корпускулярные либо волновые свойства, то ясно, что эти самые условия как-то «воздействуют» на микрообъекты.

Учитель. Всё это из области загадок квантовой механики.

Автор. Дело не в загадках. Просто на определённом уровне изучения физических явлений объекты принципиально *утрачивают свою изолированность*, исчезают использовавшиеся ранее разграничения, стираются грани. Так, стираются грани между полем и веществом (это очень принципиально, и мы об этом ещё будем подробно говорить). Недаром в мире элементарных частиц главное явление — взаимодействия частиц. *На уровне микромира приобретает глубокий смысл идея единства мира и всеобщей связи явлений.*

Учитель. И всё же, как представить себе «неизолированность» нейтрона, распадающегося в вакууме в полнейшем удалении от каких-либо тел или полей?

Автор. А как Вы понимаете вакуум?

Учитель. Как пустоту, где ничего нет.

Автор. По современным представлениям, вакуум — это не пустота. Вакуум в буквальном смысле «заполнен» случайным образом рождающимися и уничтожающимися частицами (для них введён специальный термин — «виртуальные частицы»).

Принципиально невозможно проследить за взаимодействием нашего нейтрона с виртуальными частицами вакуума, но оно, конечно, есть. Так что нельзя говорить об изолированности нейтрона в вакууме. Подчеркнём: *современный вакуум — вовсе не пустота.* Современная наука наполнила новым смыслом древнее изречение «Природа не терпит пустоты».

Как мы видим, всё далеко не просто. Во всяком случае, принцип причинности отнюдь не мешает отказаться от устаревшей привычки не замечать принципиальной важности вероятностных закономерностей, привычки искать за ними динамические закономерности.

§ 5. КРИЗИС ФИЗИКИ И «НОВЕЙШАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ»

Важнейшие открытия, сделанные в период с 1885 по 1905 г. К. 80-м годам прошлого столетия сложилось убеждение в том, что физика как наука находится на *завершающем этапе* своего развития, что описание законов природы должно вскоре принять всеобъемлющую и *окончательную* форму. Вспоминая о начале своей научной деятельности, М. Планк привёл характерный для того времени (это был 1880 г.) ответ своего учителя Ф. Жолли на вопрос о перспективах занятий физикой. Эти занятия, как полагал Жолли, перспективы не имеют, поскольку физика есть почти завершённая наука, которая теперь, после открытия закона сохранения энергии, весьма близка к той степени совершенства, какою вот уже столетия обладает геометрия. Впечатляющие достижения физики XIX в. в области механики, электромагнетизма, оптики, термодинамики порождали иллюзию полного торжества человеческого разума, раскрывшего все тайны природы, приводили (как это не раз случалось и ранее) к *абсолютизации знаний.*

И хотя вскоре был сделан целый ряд поистине сенсационных открытий, прозвучавших подобно грому среди ясного неба, победные настроения некоторое время всё ещё сохранялись. Отражением этих настроений следует считать предложение выдающегося математика Д. Гильберта (1862 – 1943) рассмотреть проблему аксиоматизации всей физики, т. е. сформулировать конечное число исходных аксиом, из которых чисто логическим путём можно было бы вывести все следствия, достаточные для полного (исчерпывающего) описания физической картины мира. Такова была шестая из двадцати трёх знаменитых проблем, выдвинутых Гильбертом в августе 1900 г. на Втором Международном конгрессе математиков.

А между тем открытия, сделанные в относительно короткий период (с 1885 по 1905 г.), красноречиво свидетельствовали о том, что ни о каком завершении физической науки не может быть и речи. Эти открытия вступали в противоречие с существующими концепциями и, как тогда представлялось, расшатывали и даже опровергали многие «старые принципы». На ещё недавно ясном физическом небосклоне вдруг появилось много облаков, грозивших затянуть весь небосклон.

Приведём перечень наиболее важных открытий, сделанных в течение упомянутых двух десятилетий. В 1885 г. И. Бальмер (1825 – 1898) обнаружил закономерность в открытой им серии спектральных линий водорода. Интенсивные исследования в области спектроскопии газов в последующие годы привели к открытию линейчатых спектров не только водорода, но и других элементов. В 1887 г. Г. Герц открыл фотоэффект, В 1888 г. это явление было переоткрыто и независимо исследовано В. Гальваксом (1859 – 1922), А. Риги (1850 – 1921) и А. Г. Столетовым (1839 – 1896). В 1887 г. А. Майкельсон (1852 – 1931) повторил в усовершенствованном варианте опыт, проделанный им ещё в 1881 г., и окончательно доказал несостоятельность гипотезы неподвижного эфира (знаменитый опыт Майкельсона — Морли). В 1895 г. В. Рентген (1845 – 1923) открыл новый вид излучения, которое он назвал *X*-лучами; впоследствии это излучение стали называть рентгеновским. В 1896 г. А. Беккерель (1858 – 1908) открыл явление радиоактивности. 1897 г. вошёл в историю физики как год открытия Дж. Дж. Томсоном электрона; в этом году было измерено отношение заряда электрона к его массе. М. Кюри-Склодовская (1867 – 1934) открывает в 1898 г. радиоактивность тория; в том же году она совместно с П. Кюри (1859 – 1906) открывает ещё два радиоактивных элемента — полоний и радий. В декабре 1900 г. М. Планк (1858 – 1947) выступил в Берлинской Академии наук с докладом «Теория закона распределения энергии нормального спектра», в котором делался вывод, что электромагнитное излучение испускается телами не непрерывно, а в виде порций энергии (квантов энергии). В 1902 – 1903 гг. Ф. Содди (1877 – 1956) совместно с Э. Резерфордом разра-

ботали теорию радиоактивного распада и экспериментально доказали превращаемость химических элементов. В 1902 г. В. Кауфман (1871 – 1947) экспериментально установил зависимость массы электрона от скорости. А. Эйнштейн (1879 – 1955) в 1905 г. сформулировал специальную теорию относительности и, кроме того, объяснил загадки фотоэффекта.

Кризис физики. Новые открытия, а также первые попытки их объяснения явно не укладывались в рамки сформировавшихся представлений. Впервые в физике была обнаружена дискретность величин; она проявилась в линейчатых спектрах газов, она потребовалась для объяснения загадок фотоэффекта и излучения чёрного тела. Физики привыкли к тому, что физические величины всегда изменяются непрерывно; идея дискретности казалась им «безумной», неприемлемой. Оказалось, что такой привычный, хотя и несколько загадочный эфир попросту не существует. В то же время появилось совершенно неизвестное ранее *X*-излучение; непонятно, куда следовало отнести это новое излучение, какова его природа. Химические элементы всегда представлялись незыблемыми, стабильными; теперь же выяснялось, что они могут взаимопревращаться (как если бы стали сбываться мечты средневековых алхимиков). Было непонятно, откуда берётся энергия, высвобождающаяся при радиоактивном распаде; в связи с этим возникали сомнения в справедливости закона сохранения энергии. Да и как было не усомниться, коль скоро пришлось убедиться в несостоятельности закона сохранения массы (ведь масса электрона зависит от его скорости!). *Создавалось впечатление, что рушатся фундаментальные законы.* Это впечатление, казалось, подтверждала специальная теория относительности, требовавшая отказа от абсолютности таких понятий, как одновременность событий, промежуток времени, протяжённость в пространстве, устанавливавшая наличие универсальной связи между энергией и массой.

Выступая на Международном конгрессе физиков в 1900 г., А. Пуанкаре (1854 – 1912), говоря об открытии катодных лучей, рентгеновских лучей, радиоактивного излучения урана и радия, подчёркивал: «Тут целый мир, о существовании которого никто и не догадывался. Всех этих неожиданных гостей надо определить к месту!» [100, с. 113]. В том же докладе Пуанкаре есть интересная характеристика умонастроений того времени: «Люди, стоящие в стороне от научной работы, поражаются кажущейся эфемерностью научных теорий. Они видят их постепенный упадок после нескольких лет процветания, видят нагромождение всё новых руин, предвидят, что и модные теперь теории в свою очередь скоро подвергнутся той же судьбе, и выводят отсюда заключение об их полной бесполезности. Они называют это банкротством науки» [100, с. 102]. Позднее, в 1904 г., Пуанкаре прямо заявляет: «...имеются признаки серьёзного кризиса» [100, с. 233]. Развивая свою мысль, он говорит о том, что *под сомнение ставятся основополагающие принципы*: принцип сохранения энергии, принцип Карно (второе начало термодинамики), принцип сохранения массы, принцип равенства действия противодействию.

Мы обратились к Пуанкаре не случайно. Важен не только факт осознания им серьёзного кризиса физики. Глубоко поучителен тот вывод, к которому в итоге приходит Пуанкаре. Подобно многим физикам тех лет, он переходит на *идеалистические* позиции физического релятивизма, заявляя, что наука исследует не сущность вещей, а лишь *отношения*. Он пишет: «Что же мы видим? Сначала нам представляется, что теории живут не долее дня и что руины нагромождаются на руины. Сегодня теория родилась, завтра она в моде, послезавтра она делается классической, на третий день она устарела, а на четвёртый — забыта. Но если всмотреться ближе, то увидим, что так именно падают, собственно говоря, те теории, которые имеют притязание открыть нам сущность вещей. Но в теориях есть нечто, что чаще всего выживает. Если одна из них открыла нам истинное отношение, то это отношение является окончательным приобретением: мы найдём его под новым одеянием в других теориях, которые будут последовательно водворяться на её место... В итоге единственной объективной реальностью являются отношения вещей, отношения, из которых вытекает мировая гармония» [100, с. 278 – 279]. Замена самих вещей отношения-

ми вещей — прямой путь к идеализму. И Пуанкаре проходит его до конца: «Всё, что не есть мысль, есть чистое ничто, ибо мы не можем мыслить ничего, кроме мысли, и все слова, которыми мы располагаем для разговора о вещах, не могут выражать ничего, кроме мыслей. Поэтому сказать, что существует нечто иное, чем мысль, значило бы высказать утверждение, которое не может иметь смысла... Жизнь есть лишь беглый эпизод между двумя вечностями смерти, и в этом эпизоде прошедшая и будущая длительность сознательной мысли — не более, как мгновение. Мысль — только вспышка света посреди долгой ночи. Но эта вспышка — всё» [100, с. 282].

Ленинский анализ «новейшей революции в естествознании». В 1909 г. вышла в свет книга В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм». Пятая глава книги названа так: «Новейшая революция в естествознании и философский идеализм». В этой главе дан *анализ сущности и причин кризиса физики*, который привёл к «новейшей революции в естествознании», рассмотрена *сущность* самой этой революции, заключающаяся в *замене материализма метафизического материализмом диалектическим*.

В чём суть кризиса физики? На этот вопрос В. И. Ленин отвечает так: *«Суть* кризиса современной физики состоит в ломке старых законов и основных принципов, в отбрасывании объективной реальности вне сознания, т. е. в замене материализма идеализмом и агностицизмом. «Материя исчезла» — так можно выразить основное и типичное по отношению ко многим частным вопросам затруднение, создавшее этот кризис» [4, с. 272 – 273]. Новейшие открытия в физике не означают, что материя исчезает на самом деле. «...Исчезает тот предел, до которого мы знали материю до сих пор, наше знание идёт глубже; исчезают такие свойства материи, которые казались раньше абсолютными, неизменными, первоначальными...» I [4, с. 275]. Такова позиция диалектического материализма, в этом его принципиальное отличие от материализма метафизического. «Разрушимость атома, неисчерпаемость его, изменчивость всех форм материи и её движения всегда были опорой диалектического материализма, — подчёркивает В. И. Ленин. — Все грани в природе условны, относительны, подвижны, выражают приближение нашего ума к познанию материи, — но это нисколько не доказывает, чтобы природа, материя сама была символом, условным знаком, т. е. продуктом нашего ума» [4, с. 298].

Анализируя причины кризиса физики, В. И. Ленин отмечает: «Новая физика свихнулась в идеализм, главным образом, именно потому, что физики не знали диалектики» [4, с. 276]. В. И. Ленин обращает внимание на следующие два важных момента. Во-первых, с углублением наших знаний о природе неизбежно развиваются математические методы её описания, они имеют тенденцию выходить на передний план и при незнании диалектики способствуют возникновению рецидивов физического идеализма. «Реакционные поползновения порождаются самим прогрессом науки. Крупный успех естествознания, приближение к таким однородным и простым элементам материи, законы движения которых допускают математическую обработку, порождает забвение материи математиками. «Материя исчезает», остаются одни уравнения. На новой стадии развития и, якобы, по-новому получается старая кантианская идея: разум предписывает законы природе» [4, с. 326]. Во-вторых, причиной физического идеализма является принцип релятивизма — принцип относительности нашего знания, «принцип, который с особенной силой навязывается физикам в период крутой ломки старых теорий и который — *при незнании диалектики* — неминуемо ведёт к идеализму» [4, с. 327]. «Все старые истины физики, вплоть до считавшихся бесспорными и незыблемыми, оказываются относительными истинами, — *значит*, никакой объективной истины, не зависящей от человечества, быть не может. Так рассуждает не только весь махизм, но весь «физический» идеализм вообще. Что из суммы относительных истин в их развитии складывается абсолютная истина, — что относительные истины представляют из себя относительно верные отражения независимого от человечества объекта, — что эти отражения становятся всё более верными, — что в каждой научной истине, несмотря на её относительность, есть элемент абсолютной истины, — все эти положения, сами собою разумеющиеся для всякого, кто думал над «Анти-Дюрингом» Эн-

гельса, представляют из себя книгу за семью печатями для «современной» теории познания» [4, с. 328].

Преодоление кризиса физики — не на путях ухода в агностицизм (признание непознаваемости окружающего мира) или идеализм (признание существования мира лишь в сознании, признание реальности лишь разума, лишь уравнений), а на пути *перехода от метафизики к диалектике* — таков основной вывод В. И. Ленина. «Материалистический основной дух физики, как и всего современного естествознания, победит всё и всяческие кризисы, но только с непременной заменой материализма метафизического материализмом диалектическим» [4, с. 324]. В замене метафизики диалектикой и заключается сущность «новейшей революции в естествознании». «Современная физика лежит в родах. Она рожает диалектический материализм» [4, с. 332].

Глава вторая

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА

§ 6. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Проблема мирового эфира. В XIX в. оптика развивалась как учение о *световых волнах*. Предполагалось, что эти волны распространяются в специфической невесомой среде, заполняющей всё мировое пространство, проникающей во все тела; эту среду называли *мировым эфиром*. «... Гипотеза о существовании эфира составляла для физика прошлого столетия важную часть представления о Вселенной, — писал в 1910 г. А. Эйнштейн. — Возникновение электромагнитной теории света внесло некоторые изменения в гипотезу об эфире... Постепенно крепло убеждение, что никакая механическая теория эфира не даёт ясного представления об электромагнитных явлениях, и тогда стали рассматривать электрические и магнитные поля как сущности, механическое толкование которых является излишним. Прямым следствием такого толкования было то, что эти поля в пустоте стали рассматривать как особые состояния эфира, не требующие более детального анализа» [143, с. 138 – 139].

Если принять существование эфира, то необходимо ответить на вопрос о характере воздействия на этот эфир со стороны движущихся тел. Здесь возможны две крайние альтернативы. *Первая:* всякое тело при своём движении полностью увлекает за собой эфир. *Вторая:* при движении тела эфир остаётся неподвижным; в этом случае наблюдатель, находящийся на движущемся теле, должен был бы, в принципе, обнаружить «эфирный ветер».

Сначала была отвергнута первая альтернатива. Результаты выполненного в 1851 г. интерференционного опыта А. Физо (1819 – 1896), а также наблюдение аберрации света, приходящего к нам от звёзд, убедительно свидетельствовали против гипотезы о полном увлечении эфира движущимися телами. Получалось, что мировой эфир в целом неподвижен, движущиеся тела могут лишь частично увлекать его. Оставалось обнаружить экспериментально «эфирный ветер».

Эксперимент по обнаружению «эфирного ветра» при движении Земли сквозь неподвижный мировой эфир был поставлен А. Майкельсоном в 1881 г. и повторён им в более усовершенствованном варианте в 1887 г. (совместно с Э. Морли). Отрицательный результат эксперимента нанёс сокрушительный удар также и по второй альтернативе — гипотезе неподвижного эфира. Стремясь спасти положение, Г. А. Лоренц (1853 – 1928) выдвинул в 1892 г. предположение, что «эфирный ветер» обусловливает сокращение размеров тел в направлении их движения в $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ раз (здесь v и c — соответственно скорости тела и света относительно неподвижного эфира). Оказалось, что аналогичное предположение сделал ещё в 1889 г. Г. Фицджеральд (1851 – 1901). «Чтобы привести отрицательный результат эксперимента Майкельсона в согласие с теорией, — писал впоследствии Эйнштейн, — Лоренц и Фицджеральд выдвинули гипотезу о том, что плита интерферометра со всеми смонтированными на ней приборами испытывает в направлении движения Земли небольшое сокращение, как раз такое, что ожидаемый эффект компенсируется противоположным эффектом». И тут же Эйнштейн замечал: «Способ действия, когда добиваются согласия теории с отрицательным результатом эксперимента с помощью выдвинутой специально для этого гипотезы, выглядит крайне неестественным» [143, с. 415]. Пуанкаре называл подобные подходы к решению научных проблем «лоскутными».

Полагая, что гипотеза о сокращении размеров движущихся тел объясняет отрицатель-

ный результат опыта Майкельсона, Лоренц продолжал рассматривать распространение световых волн в неподвижном эфире и разработал в 1895 г. весьма стройную теорию — *электродинамику движущихся сред*. При всех своих достоинствах эта теория имела, однако, существенный изъян — она предполагала *отказ от принципа относительности:* вводила физическое неравноправие разных инерциальных систем отсчёта. С неподвижным эфиром связывалась особая система отсчёта, которую можно было считать *абсолютно неподвижной*; все остальные инерциальные системы оказывались принципиально отличными от неё. Как подчёркивал Эйнштейн, «если в механике не существует абсолютного движения, а только движение одних тел относительно других, то в теории Лоренца существует особое состояние, которое физически соответствует состоянию абсолютного покоя; это состояние тела, неподвижного относительно эфира» [143, с. 144].

Отказ от принципа относительности представлялся слишком дорогой ценой. Возникал вопрос: нельзя ли всё же согласовать основные положения теории Лоренца с принципом относительности? В 1904 – 1905 гг. этот вопрос встал особенно остро. В связи с этим отметим три события. Первое: выход в свет в 1904 г. основополагающей работы Лоренца «Электромагнитные явления в системах, движущихся с произвольной скоростью, меньшей скорости света». Здесь были окончательно сформулированы знаменитые преобразования координат и времени для перехода из одной инерциальной системы отсчёта в другую (Пуанкаре предложил назвать их преобразованиями Лоренца; так они и вошли в науку). Второе событие: выход в свет в том же 1904 г. статьи Пуанкаре, где чётко формулируется принцип относительности: «Законы физических явлений будут одинаковыми как для покоящегося наблюдателя, так и для наблюдателя, находящегося в состоянии равномерного прямолинейного движения, так что мы не имеем никаких средств, чтобы различать, находимся ли мы в таком движении или нет» [101, с. 302]. И наконец, третье событие, наиболее важное: появление в 1905 г. фундаментальной работы А. Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел». Именно с этой работой связывают рождение *специальной теории относительности*. Здесь был сделан решающий шаг: положения теории Лоренца были приведены в соответствие с принципом относительности благодаря принципиально новому подходу к фундаментальным вопросам пространства и времени. Существенно, что при этом пришлось *вообще отказаться от эфира*; тем самым проблема мирового эфира была окончательно решена.

Позднее Эйнштейн писал: «Оглядываясь на развитие физики, мы видим, что вскоре после своего рождения эфир стал «выродком» в семье физических субстанций. Во-первых, построение простой механической модели эфира оказалось невозможным и было отброшено. Этим в значительной степени был вызван крах механистической точки зрения. Во-вторых, мы должны были потерять надежду на то, что благодаря существованию эфирного моря будет выделена одна система координат, что позволило бы нам опознать не только относительное, но и абсолютное движение. Это было бы единственным путём, если не считать, что он переносит волны, которым эфир проявляет себя и оправдывает своё существование. Все наши попытки сделать эфир реальным провалились» [145, с. 467]. Говоря о теории относительности, Эйнштейн подчёркивал: «... Представление об эфире как носителе электрических и магнитных сил не находит места в излагаемой здесь теории. Напротив, электромагнитные поля оказываются здесь не состояниями некоторой материи, а самостоятельно существующими объектами, имеющими одинаковую природу с весомой материей и обладающими вместе с ней свойством инерции» [143, с. 66].

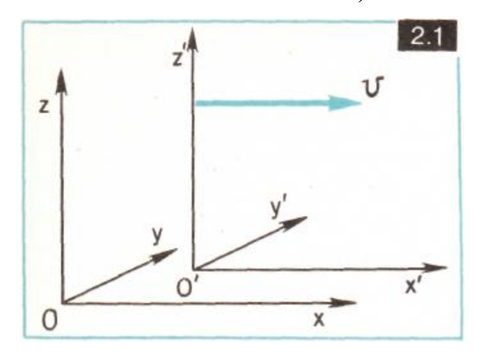
Специальная теория относительности. По словам Эйнштейна, «теория относительности начинается с двух положений»: «1. Скорость света в вакууме одинакова во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. 2. Все законы природы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга» [145, с. 469]. Таковы два основополагающих принципа — *принцип постоянства скорости света* и *принцип относительности*. Фактически принцип постоянства скорости света является следствием принципа относительно-

сти. «В теории Лоренца, — отмечал Эйнштейн, — принцип постоянства скорости света справедлив только для одной системы — системы, находящейся в покое относительно эфира. Если мы хотим сохранить принцип относительности, мы обязаны допустить справедливость принципа постоянства скорости света для любой системы, движущейся без ускорения» [143, с. 146].

В классической механике переход от одной инерциальной системы координат к другой описывался *преобразованиями Галилея:*

$$x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t \tag{1}$$

(штрихованная система движется со скоростью v относительно нештрихованной, как это показано на рис. 2.1). Скромное равенство $t' = t$ означало, что во всех системах время течёт *одинаково,* что слова «сейчас», «настоящий момент» имеют абсолютный смысл (факт, представлявшийся очевидным до начала XX столетия).



В специальной теории относительности вместо преобразований Галилея применяются *преобразования Лоренца:*

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - (vx/c^2)}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{2}$$

(здесь $\beta = v/c$). Позднее мы покажем, как можно получить эти преобразования, исходя из основополагающих принципов специальной теории относительности (заметим, что сам Лоренц шёл к преобразованиям более сложным путём — используя произвольные допущения). Теперь следует говорить не о системе координат, а о *системе отсчёта*, т. е. о совокупности системы координат и часов. Абсолютности времени больше нет, каждая система отсчёта характеризуется своим собственным временем. *Указывая момент времени, надо указывать также соответствующую систему отсчёта*. Позднее мы рассмотрим некоторые следствия преобразований Лоренца: относительность одновременности событий, временн*ы*х промежутков между событиями, длин, а также новое правило сложения скоростей. Подчеркнём, что все эти «новации» проявляются лишь при достаточно больших относительных скоростях систем; если же $v \ll c$ ($\beta \ll 1$), то, как легко видеть, преобразования (2) переходят в преобразования (1) — специальная теория относительности переходит в классическую механику как свой предельный случай.

При создании специальной теории относительности Эйнштейн не просто воспользовался уже готовыми преобразованиями Лоренца; он усмотрел в них принципиально новый физический смысл. Лоренц исходил, как известно, из гипотезы неподвижного эфира и связывал с эфиром абсолютно покоящуюся систему отсчёта. Он полагал, что только в этой системе длина тела и ход часов являются «истинными». При переходе к другим системам (системам, движущимся относительно покоящейся системы с той или иной скоростью) происходит, как он считал, *буквальное* сокращение размера тела — как результат воздействия «эфирного ветра» на электронную структуру тела. Чем больше скорость тела относительно мирового эфира, тем сильнее «эфирный ветер» и, как следствие, тем значительнее сокращение размера тела в направлении движения.

Теперь обратимся к Эйнштейну. У него эфира нет вообще, а значит, нет привилегиро-

ванной (абсолютно покоящейся) системы отсчёта; *все инерциальные системы физически равноправны*. Соответственно нет и абсолютного сокращения продольного размера тел. Наблюдатель из нештрихованной системы (см. рис. 2.1) фиксирует укорочение тела, покоящегося в штрихованной системе. В свою очередь, наблюдатель из штрихованной системы зафиксирует укорочение тела, находящегося в нештрихованной системе. Представим себе такую ситуацию: две шарообразные капсулы (в одной сидит наблюдатель *А*, а в другой — наблюдатель *Б*) с большой скоростью движутся друг относительно друга. Наблюдателю *А* другая капсула будет представляться не сферой, а сплюснутым эллипсоидом вращения; у собственной же капсулы он никаких отклонений от сферической формы не обнаружит. Точно так же наблюдателю *Б* собственная капсула будет представляться сферой, а другая капсула — эллипсоидом. Подобный пример как раз и приводит Эйнштейн. Он пишет о наблюдателе, воспринимающем проносящееся мимо него шарообразное тело в виде сплюснутого эллипсоида вращения. «С точки же зрения наблюдателя, движущегося вместе с телом, — отмечает Эйнштейн, — оно, как и прежде, сохраняет форму шара, однако все предметы, не движущиеся вместе с этим наблюдателем, точно таким же образом представляются ему укороченными в направлении движения. Этот результат оказывается не таким уж странным, если учесть, что это высказывание о размерах движущегося тела имеет весьма сложный смысл, поскольку в соответствии с предыдущим размеры тела можно определить только с помощью измерения времени» [143, с. 184]. *Пространство и время рассматриваются теперь во взаимосвязи*. Не только продольные размеры тела, но и ход времени зависят от выбора системы отсчёта, из которой ведётся наблюдение. С точки зрения наблюдателя *А* (в приведённом выше примере) часы наблюдателя *Б* будут отставать; наблюдатель же *Б* будет утверждать, что, напротив, его часы идут правильно, а вот часы наблюдателя *А* отстают.

«Подобно Лоренцу Эйнштейн понял, что измерения длины и времени должны зависеть от относительного движения объекта и наблюдателя. Однако Лоренц прошёл только половину пути. Он сохранил понятие абсолютной длины и времени для покоящихся тел; он считал, что эфирный ветер искажает «истинную» длину и время. Эйнштейн прошёл путь до конца. Эфирного ветра не существует, сказал он. Нет смысла в понятиях абсолютной длины и времени. Это ключ к специальной теории относительности Эйнштейна. Когда он его повернул, всевозможные замки начали медленно открываться [27, с. 49]. «Эйнштейн вывел преобразования Лоренца исходя из двух фундаментальных принципов и таким образом показал, что именно преобразования Лоренца (а не преобразования Галилея) описывают универсальные взаимосвязи, отражающие характерные особенности пространства и времени как таковых... И хотя Эйнштейн пользовался той же самой математической записью этих преобразований, что и Лоренц и Пуанкаре, применял он их, опираясь на принципиально новые концепции пространства и времени» [40, с. 144].

Применив преобразования Лоренца к уравнениям Максвелла, Эйнштейн получил преобразования для напряжённостей электрического и магнитного полей при переходе из одной инерциальной системы в другую. Рассматривая изображённые на рисунке 2.1 штрихованную и нештрихованную системы отсчёта и следуя работе Эйнштейна «Принцип относительности и его следствия» (1910), где через $\vec{E}$ и $\vec{M}$ обозначены векторы напряжённости соответственно электрического и магнитного полей, представим указанные преобразования в виде

$$\left.\begin{aligned} E'_x = E_x, \qquad E'_y = \frac{E_y - \frac{v}{c} M_z}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad E'_z = \frac{E_z + \frac{v}{c} M_y}{\sqrt{1-\beta^2}}, \\ M'_x = M_x, \qquad M'_y = \frac{M_y + \frac{v}{c} E_z}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad M'_z = \frac{M_z - \frac{v}{c} E_y}{\sqrt{1-\beta^2}}. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Предположим, что в нештрихованной системе есть неподвижный электрический заряд и, значит, есть электрическое поле, но нет магнитного ($M_x = M_y = M_z = 0$). Из соотношений (3) видно, что в штрихованной системе, наряду с электрическим, будет наблюдаться также магнитное поле. Это естественно, так как покоящийся в нештрихованной системе заряд является движущимся в штрихованной системе. Эйнштейн подчёркивал: «Существование электрического поля, равно как и магнитного, зависит от движения системы координат» [143, с. 162]. Он отмечал, что такой вывод нельзя было бы согласовать с представлением о полях как о некоторых состояниях мирового эфира.

В работе «Зависит ли инерция тела от содержащейся в нём энергии?» (1905) Эйнштейн приходит к заключению: «... Если тело отдаёт энергию E в виде излучения, то его масса уменьшается на E/c^2... Масса тела есть мера содержащейся в нём энергии» [143, с. 38]. Позднее он формулирует следующий важный вывод специальной теории относительности: «масса и энергия эквивалентны друг другу»; появляется знаменитая *формула Эйнштейна*, связывающая энергию и массу:

$$E = mc^2. \tag{4}$$

В классической механике используются хорошо известные выражения для импульса ($\vec{p}$) и кинетической энергии (E):

$$\vec{p} = m\vec{v}, \tag{5}$$

$$E = mv^2/2. \tag{6}$$

При достаточно больших скоростях (в этом случае говорят о «релятивистской механике») специальная теория относительности приводит к более общим выражениям для импульса и энергии:

$$\vec{p} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{7}$$

$$E = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}c^2. \tag{8}$$

Через m_0 обозначена *масса покоя* (масса тела в системе отсчёта связанной с этим телом), а через $\vec{p}$ и E — импульс и энергия тела, рассматриваемые в системе, относительно которой тело движется со скоростью v. При введении *релятивистской массы*

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \tag{9}$$

выражение (8) принимает вид (4).

Если $v \ll c$ ($\beta \ll 1$), то

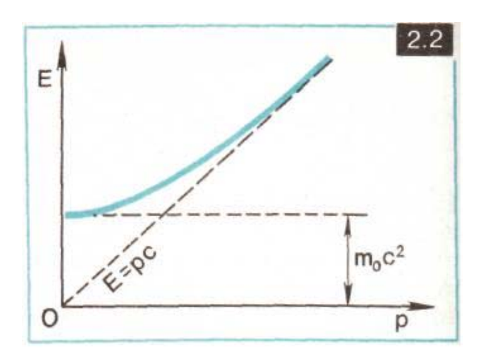
$$E = m_0c^2(1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}} = m_0c^2\left(1 + \frac{\beta^2}{2} + \ldots\right) = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2} + \ldots \tag{10}$$

Слагаемое $m_0v^2/2$ — хорошо известное читателю выражение для кинетической энергии, m_0c^2 — энергия покоя (классической механике эта энергия не была известна).

Используя (7) — (9), нетрудно получить следующее соотношение, связывающее энергию и импульс в релятивистской механике:

$$E = \sqrt{m_0^2c^4 + p^2c^2}. \tag{11}$$

Эта зависимость энергии от импульса изображена на рисунке 2.2. При малых значениях импульса: $E = m_0c^2 + p^2 / 2m_0$, а при достаточно больших: $E = pc$.



До создания специальной теории относительности законы сохранения энергии и массы рассматривались как два самостоятельных закона сохранения. Теперь же оба эти закона слились в один. По выражению Эйнштейна, масса должна рассматриваться как «сосредоточие колоссального количества энергии».

В заключение приведём ёмкую характеристику специальной теории относительности, содержащуюся в книге А. Эйнштейна и Л. Инфельда «Эволюция физики»: «Влияние теории относительности выходит далеко за пределы тех проблем, из каких она возникла. Она снимает трудности и противоречия теории поля; она формулирует более общие механические законы; она заменяет два закона сохранения одним; она изменяет наше классическое понятие абсолютного времени. Её ценность не ограничивается лишь сферой физики; она образует общий остов, охватывающий все явления природы» [14, с. 483].

Вывод преобразований Лоренца по Эйнштейну. Найдём x' и t', если известны x и t (см. рис. 2.1). Будем исходить из того, что в обеих системах (штрихованной и нештрихованной) световой сигнал распространяется с одной и той же скоростью — скоростью c. Поэтому для световых лучей, распространяющихся вдоль положительного направления оси x (а также оси x'), можем записать: $x - ct = 0$ и $x' - ct' = 0$. Отсюда следует, что

$$x' - ct' = \lambda(x - ct) \tag{12}$$

(λ — некоторая постоянная). Аналогично для лучей, распространяющихся вдоль отрицательного направления оси x (оси x'), получаем

$$x' + ct' = \mu(x + ct) \tag{13}$$

(μ — некоторая постоянная). Из (12) и (13) находим

$$\left.\begin{aligned} x' &= ax - bct, \\ ct' &= act - bx, \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

где $a = (\lambda + \mu)/2$, $b = (\lambda - \mu)/2$. Для начала координат штрихованной системы ($x' = 0$) запишем, исходя из первого уравнения (14): $x = bct / a$. Значит, bc / a есть скорость, с какой штрихованная система движется относительно нештрихованной:

$$bc / a = v \tag{15}$$

(разумеется, с точно такой же по модулю скоростью нештрихованная система движется относительно штрихованной).

Далее воспользуемся принципом относительности. В соответствии с ним длина некоторого тела, покоящегося в штрихованной системе, измеряемая наблюдателем из нештрихованной системы, должна быть равна длине такого же тела, покоящегося в нештрихованной системе, если теперь эту длину измеряют из штрихованной системы. Выполним первое из указанных двух измерений: сделаем из нештрихованной системы в момент $t = 0$ «моментальный снимок» тела в штрихованной системе. Из первого уравнения (14):

$x' = ax$. Пусть собственная длина тела (длина в системе, где тело покоится) есть L и пусть в штрихованной системе (где как раз тело покоится) эта длина равна длине отрезка оси от нуля до точки x' ($L = x'$). Тогда, с точки зрения наблюдателя, находящегося в нештрихованной системе, длина тела будет $L_1 = x = x'/a = L/a$. Теперь выполним второе измерение: сделаем из штрихованной системы в момент $t' = 0$ «моментальный снимок» тела в нештрихованной системе. Из второго уравнения (14): $act = bx$, или $x = act/b$, или, с учётом (15), $t = vx/c^2$. Принимая во внимание также первое уравнение (14), находим $x' = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)x$. Полагаем $x = L$ (собственная длина тела); тогда, с точки зрения наблюдателя, находящегося в штрихованной системе, длина тела будет $L_2 = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)L$. В соответствии с принципом относительности надо приняты $L_1 = L_2$. Таким образом, $\frac{L}{a} = a\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)L$, или

$$a^2 = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}. \quad (16)$$

С учетом (15) и (16) перепишем (14) в виде

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \qquad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (17)$$

Мы пришли к известным преобразованиям Лоренца. Обратим внимание, что, следуя Эйнштейну, мы использовали при выводе этих преобразований всего два принципа: принцип относительности и принцип постоянства скорости света.

Некоторые следствия из преобразований Лоренца. *Относительность одновременности событий.* Пусть два события имеют в нештрихованной системе пространственно-временные координаты x_1, t_1 и x_2, t_2 а в штрихованной системе — координаты x_1', t_1' и x_2', t_2' соответственно. Согласно (17),

$$t_2' - t_1' = \frac{(t_2 - t_1) - v(x_2 - x_1)/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (18)$$

(напоминаем: $\beta = v/c$). Предположим, что события происходят в нештрихованной, системе одновременно, но в разных пространственных точках ($t_2 = t_1,\ x_2 \neq x_1$). Из (18) видно, что $t_2' \neq t_1'$; таким образом, в штрихованной системе указанные события оказываются неодновременными.

Относительность промежутков времени. Пусть в одной и той же точке в штрихованной системе происходят два события, разделённые промежутком времени τ' ($x_2' = x_1',\ t_2' - t_1' = \tau'$). Предположим, что эта система связана с космическим кораблём, летящим со скоростью v относительно Земли, и пусть упомянутые два события — космонавт покинул кресло, космонавт вернулся в кресло. Штрихованная система — система покоя для данных событий, они происходят в одной и той же точке. Промежуток времени между двумя событиями в системе покоя называют собственным временем.

Теперь обратимся к нештрихованной системе отсчёта, связанной, в данном случае с Землёй. Обсуждаемые события, если их рассматривать с Земли, будут происходить в разных пространственных; точках: x_2 и x_1. По часам земного наблюдателя эти события раз-

деляет промежуток времени $\tau = t_2 - t_1$. Используя (17), нетрудно найти

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \qquad t' = \frac{t' + \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{19}$$

Отсюда следует, что

$$\tau = \frac{(t_2' - t_1') + \frac{v}{c^2}(x_2' - x_1')}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\tau'}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{20}$$

Мы видим, что промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчёта. Он минимален в системе покоя для данных событий (собственное время). Рассматриваемый промежуток возрастает в $(1-\beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ раз в системе, движущейся со скоростью v относительно системы покоя. Пусть скорость космического корабля близка к скорости света; вообразим, что $v/c = 0{,}9999$ (корабль будущего?). Тогда $\tau \approx 70\tau'$. Космонавт покинул кресло (по часам корабля) всего на 20 мин, а на Земле между этими событиями (покинул кресло — возвратился в кресло) прошли целые сутки.

Конечно, данная ситуация обратима. Читатель на Земле прочтёт параграф книги за 20 мин, а наблюдателю с космического корабля это чтение представится продолжавшимся целые сутки. Обратимость ситуации исчезает, если стартовавший с Земли космический корабль в конечном счёте возвратится на Землю. Но это уже сюжет из области не специальной, а общей теории относительности (см. ниже).

Относительность длины (сокращение Лоренца — Фицджеральда). Пусть тело покоится в штрихованной системе, его собственная длина $x_2' - x_1' = L$. Выполним «моментальный снимок» тела из нештрихованной системы в момент $t = 0$. Из (19) следует, что наблюдатель из нештрихованной системы зафиксирует длину

$$L_1 = x_2 - x_1 = \frac{(x_2' - x_1') + v(t_2' - t_1')}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{L - \beta^2 L}{\sqrt{1-\beta^2}} = L\sqrt{1-\beta^2}. \tag{21}$$

Скорость тела в разных системах отсчёта. Пусть тело равномерно движется в нештрихованной системе со скоростью V в направлении оси x; V' — скорость этого тела в штрихованной системе. Так как $V = x/t$ и $V' = x'/t'$, то из (19) немедленно получаем:

$$V = \frac{x' + vt'}{t' + vx'/c^2} = \frac{V' + v}{1 + vV'/c^2}. \tag{22}$$

Так несколько непривычно выражается скорость тела в одной системе отсчёта через его скорость в другой системе. При $v \ll c$ получаем классическое правило сложения скоростей; в рассматриваемом случае оно имеет вид $V = V' + v$.

Преобразования Лоренца как поворот осей в четырёхмерном континууме. Пространство — это *трёхмерный континуум.* «Трёхмерный» — потому что положение точки определяется в пространстве тремя числами (тремя пространственными координатами). «Континуум» означает непрерывность — около любой данной точки можно указать сколько угодно других точек, координаты которых могут быть сколь угодно близки к координатам заданной точки. Известно, что все события происходят в пространстве и во времени. Однако в классической физике пространство и время рассматривались как *самостоятельные* категории; время было абсолютным — оно не зависело от пространственных координат события. Согласно же специальной теории относительности *время нельзя рассматривать независимо от пространства*, не имеет смысла говорить «сейчас», если не оговорено «где»; время и пространство оказались внутренне взаимосвязанными. Разви-

вая идеи, высказанные ещё в 1905 г. Пуанкаре, математик Г. Минковский (1864 – 1909) дал в 1908 г. геометрически наглядное представление специальной теории относительности, введя *четырёхмерный пространственно-временной континуум* (четырёхмерный мир Минковского). Всякое физическое событие есть некоторая точка в таком четырёхмерном мире, она определяется четырьмя числами — тремя координатами и временем.

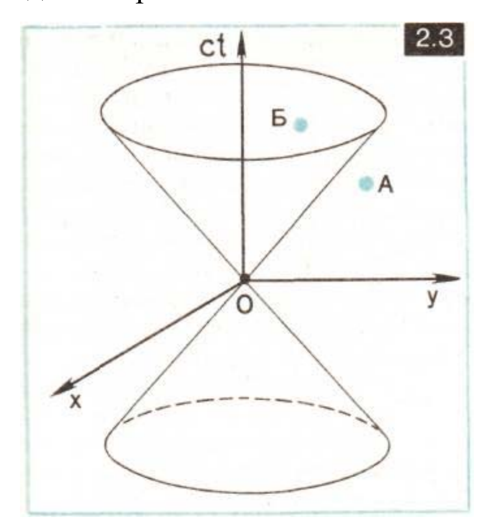
Рассмотрим в некоторой системе отсчёта следующие два события: первое — световой сигнал возник в точке $x = y = z = 0$ в момей времени $t = 0$; второе — этот сигнал зафиксирован в некоторой точке x, y, z в момент t. Легко сообразить, что

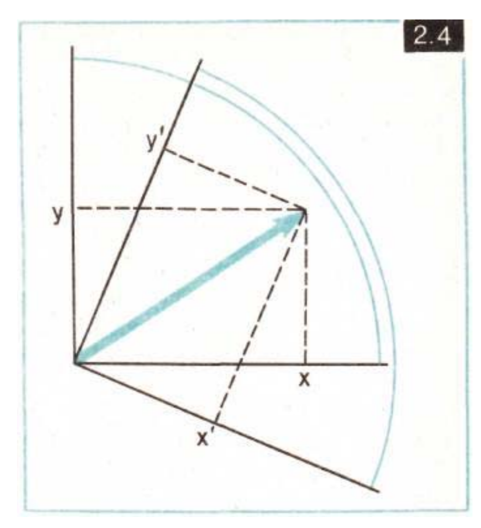
$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0. \tag{23}$$

(сигнал прошёл расстояние $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ за время t со скоростью c). Равенство (23) задаёт в четырёхмерном континууме некоторую «поверхность». Конечно, представить её, равно как и сам четырёхмерный континуум, мы наглядно не можем. Но мы можем прибегнуть к небольшой хитрости: будем учитывать не три, а лишь две пространственные координаты, а в качестве третьей координаты выберем координату, пропорциональную времени, скажем, величину ct (рис. 2.3). При этом вместо (23) будем иметь

$$x^2 + y^2 - c^2t^2 = 0. \tag{24}$$

Равенство (24) задаёт в изображённом на рисунке «пространстве» коническую поверхность, она отграничивает так называемый световой конус (угол между осью ct и образующими конической поверхности равен 45°). События-точки нашего «пространства», для которых $t > 0$, резонно отнести к будущему, а события при $t < 0$ — к прошлому. «Будущие» события, лежащие на поверхности верхней половины светового конуса или внутри него, могут быть причинно связаны с событием в точке $x = y = ct = 0$; поэтому ясно, что любое из тех событий действительно происходит *позже* события в $x = y = ct = 0$. Если же событие с $t > 0$ находится вне светового конуса, то нельзя утверждать, что оно произошло позже события в $x = y = ct = 0$; между этими событиями нет причинной связи. Например, событие A никоим образом не может быть следствием события O (см. рис. 2.3), поэтому невозможно судить, какое из этих двух событий происходит «раньше», а какое «позже». Итак, будущее (по отношению к событию O) ограничено верхней половиной светового конуса, тогда как прошлое — нижней половиной.





Рассмотрим два причинно связанных события (например, события O и $Б$ на рисунке); событие O — $x = y = ct = 0$, событие $Б$ — x, y, ct. Величину $r = \sqrt{c^2t^2 - (x^2 + y^2)}$ называют *интервалом* между указанными событиями (в частном случае, когда события «связаны» световым лучом, интервал обращается в нуль). Используя преобразования Лоренца, легко

убедиться, что

$$(x')^2+(y')^2-(ct')^2=x^2+y^2-(ct)^2. \tag{25}$$

Таким образом, интервал между событиями остаётся неизменным при переходе из одной инерциальной системы отсчёта в другую. Это очень важный результат, он требует дополнительного обсуждения.

Что напоминает соотношение (25)? В качестве подсказки предложим сначала вообще не рассматривать время, пусть будет

$$(x')^2+(y')^2=x^2+y^2. \tag{26}$$

А теперь обратимся к рисунку 2.4. Здесь x и y — координаты конца некоторого вектора в нештрихованной системе, а x' и y' — координаты того же самого вектора в другой (штрихованной) системе координат; эти системы повёрнуты одна относительно другой на некоторый угол. При повороте системы координатных осей изменяются, как хорошо видно, координаты вектора, но остаётся неизменным его модуль — это и выражает равенство (26). От двумерного пространства перейдём к трёхмерному, где третье измерение связано с временем, и посмотрим на равенство (25) по аналогии с тем, как мы смотрели на (26). Возможно, вызовет смущение минус перед $(ct)^2$. Однако с минусом легко формально справиться, введя мнимую величину $\tau=ict$, где $i=\sqrt{-1}$. В этом случае выражение (25) принимает вид

$$(x')^2+(y')^2+(\tau')^2=x^2+y^2+\tau^2. \tag{27}$$

В общем (четырёхмерном) случае приходим к соотношению:

$$(x')^2+(y')^2+(z')^2+(\tau')^2=x^2+y^2+z^2+\tau^2. \tag{28}$$

С учётом сделанных замечаний можно рассматривать полученный результат как сохранение неизменным модуля четырёхмерного вектора (его координаты в нештрихованной системе: $x, y, z, \tau=ict$) при повороте осей четырёхмерного пространственно-временного континуума. Этот поворот соответствует переходу от нештрихованной системы отсчёта к штрихованной (от $x, y, z, \tau=ict$ к $x', y', z', \tau'=ict'$). Таким образом, преобразования Лоренца могут рассматриваться формально как *чисто геометрическое преобразование (поворот осей)*, выполняемое, однако, не в обычном трёхмерном пространстве, а в *четырёхмерном континууме*. Как отмечал Эйнштейн, «даже нематематику должно быть ясно, что благодаря этому чисто формальному положению теория относительности чрезвычайно выиграла в наглядности и стройности» [143, с. 559].

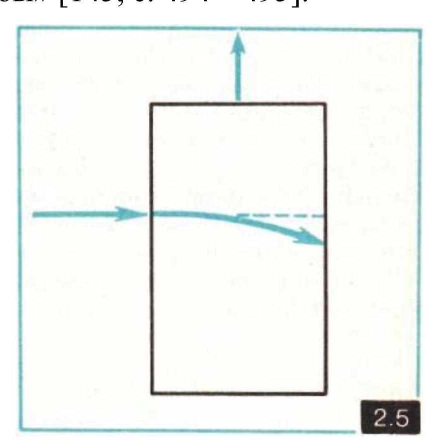
Замечания, касающиеся общей теории относительности. Эта удивительная теория была создана Эйнштейном в течение десяти лет, последовавших за созданием специальной теории относительности (период с 1905 по 1915 г.). Почему такой фундаментальный принцип, каким является принцип относительности, должен быть применим лишь к инерциальным системам? Не следует ли вслед за отказом от абсолютного времени отказаться от особой роли инерциальных систем отсчёта? Из подобных сомнений и выросла в конечном счёте *общая теория относительности*, представляющая собой (по сравнению со специальной теорией относительности) следующий и притом очень существенный шаг вперёд в понимании фундаментальных проблем, связанных с пространством и временем.

Согласно второму закону Ньютона, сила = инертная масса × ускорение, а согласно закону всемирного тяготения, сила = тяжёлая масса × напряжённость поля тяготения. Таким образом,

$$\textit{ускорение}=\frac{\textit{тяжёлая масса}}{\textit{инертная масса}}\times \textit{напряжённость поля тяготения.}$$

Эквивалентность тяжёлой и инертной масс означает, как можно видеть, *эквивалентность ускорения и поля тяготения*.

Обратимся к знаменитым мысленным экспериментам Эйнштейна. Представим себе свободно падающий в поле тяготения лифт с наблюдателем. Ясно, что у другого наблюдателя, который находится на поверхности Земли и видит падающий вниз лифт, нет никаких сомнений, что лифт движется под действием тяготения. Однако вряд ли такой вывод сделает наблюдатель внутри лифта. Он ощущает невесомость, выпущенный из руки карандаш повисает в воздух рядом с рукой — нет никаких указаний на тяготение. «Странные вещи происходят в лифте! — пишет Эйнштейн. — Если наблюдателель толкает тело в каком-либо направлении, например, вверх или вниз, то оно всегда движется прямолинейно и равномерно, пока не столкнётся с потолком или полом лифта. Короче говоря, законы классической механики справедливы для наблюдателя внутри лифта. Все тела ведут себя так, как следовало ожидать по закону инерции… Внешний наблюдатель замечает движение лифта и всех тел в нём и находит его соответствующим закону тяготения Ньютона. Для него движение является не равномерным, а ускоренным... Однако поколение физиков, рождённое и воспитанное в лифте, рассуждал бы совершенно иначе. Оно было бы уверено в том, что находится в инерциальной системе...» Далее Эйнштейн заключает: «Из этого примера мы видим, что последовательное описание физических явлений в двух различных системах координат возможно, даже если они не движутся прямолинейно и равномерно друг относительно друга. Но для такого описания мы должны принять во внимание тяготение, создающее, так сказать, «мост», позволяющий перейти от одной системы координат к другой. Поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего наблюдателя оно не существует. Ускоренное движение лифта в поле тяготения существует для внешнего наблюдателя, для внутреннего же наблюдателя — покой. Но «мост», т. е. поле тяготения, делающий описание в обеих системах координат возможным, покоится на одной очень важной опоре: *эквивалентности тяжёлой и инертной масс*. Без этой руководящей идеи, оставшейся незамеченной в классической механике, наши теперешние рассуждения полностью отпали бы» [145, с. 494 – 495].



Рассмотрим ещё один мысленный эксперимент Эйнштейна. К лифту, который до того покоился в инерциальной системе отсчёта, кто-то извне привязал канат и стал тянуть лифт в какую-то сторону с постоянной силой. С точки зрения внешнего наблюдателя (находящегося в инерциальной системе), лифт движется с постоянным ускорением. С точки же зрения наблюдателя внутри лифта, нет движения с ускорением, а есть некоторое поле тяготения. Итак, один полагает неравномерность движения и отсутствие тяготения, а другой — покой и наличие тяготения. Эйнштейн считает, что принципиально невозможно доказать правоту того или иного наблюдателя. Можно было бы, например, пропустить сквозь лифт горизонтальный световой луч (полагаем при этом, что ускорение лифта направлено «вверх»). Внешний наблюдатель скажет: световой луч движется горизонтально, но лифт движется вверх и, значит, он сместится вверх за тот промежуток времени, какой требуется лучу, чтобы пройти расстояние от одной стенки лифта до другой. Поэтому луч упадёт на

заднюю стенку в точке, которая находится немного ниже точки входа луча на передней стенке (рис. 2.5). Казалось бы, наблюдатель внутри лифта посрамлён — вот доказательство истинности позиции внешнего наблюдателя. Но не следует спешить с таким заключением. «Луч света несёт энергию, — замечает Эйнштейн, — а энергия имеет массу. Но на всякую инертную массу поле тяготения оказывает воздействие, так как инертная и тяжёлая массы эквивалентны. Луч света будет искривляться в поле тяготения точно так же, как искривляется траектория тела, брошенного горизонтально» [145, с. 497].

Таков был путь Эйнштейна к *принципу эквивалентности* — центральному стержню общей теории относительности. Об этом принципе очень хорошо сказал М. Гарднер: «Принцип эквивалентности не что иное, как ошеломляющее утверждение (Ньютон счёл бы Эйнштейна безумцем), что тяжесть и инерция одно и то же. Это не просто похожие явления. Тяжесть и инерция — два различных слова для одного и того же явления» [27, с. 84].

В своё время Ньютон, сформулировав знаменитый закон всемирного тяготения, не смог объяснить причину тяготения. Общая теория относительности Эйнштейна дала тяготению совершение неожиданное объяснение. В пустом пространстве тело движется по инерции прямолинейно и равномерно потому, что в таком пространстве кратчайшее расстояние между двумя точками — прямая линия. Представим себе теперь, что в пространстве появилась значительная масса — мы говорим, что теперь тело движется под действием силы тяжести, обусловленной полем тяготения, появившимся вместе с упомянутой массой. Но можно, оказывается, рассуждать иначе: масса изменяет структуру самого́ пространства — она как бы *искривляет* его, делая кратчайшим расстоянием уже не пряму, а кривую линию. Подчеркнём: тяготение — не причина кривизны пространства, это и есть сама кривизна. Структура пространства, его кривизна определяется кривизной его геодезических линий. С точки зрения общей теории относительности движение тела в поле тяготения можно рассматривать как движение по инерции вдоль искривлённой геодезической линии. Поистине инерция и тяжесть оказались двумя сторонами одной и той же медали.

Поскольку искривление пространства тем сильнее, чем больше вызывающая это искривление масса, то, следовательно, свойства пространства и времени должны рассматриваться *в теснейшей связи с материей*. В классической механике время рассматривалось независимо от пространства, а пространство и время рассматривались независимо от материи. Существовали абсолютное время и абсолютное пространство, в которые была «погружена» материя. Теория относительности заставила решительно пересмотреть такую точку зрения. На первом своём этапе (специальная теория относительности) она продемонстрировала *взаимосвязь пространства и времени*, показала, что нет времени вне пространства; на втором этапе (общая теория относительности) была показана *взаимосвязь пространства-времени с материей*. В сильных полях тяготения не только происходит искривление геодезических линий, но и *замедляется ход времени*. Мы вынуждены ограничиться этими замечаниями, так как более детальное рассмотрение подобных вопросов потребовало бы обращения к математическому аппарату общей теории относительности.

Диалог. О времени



— Что такое время?
— Это то, что показывают часы.
На уроке физики.

Автор. Фактически в любом школьном предмете используется понятие времени. Все исторические события, все процессы (физические, химические, биологические) протекают во времени. Без сомнения, *время* — одно из важнейших понятий. По самой своей сути оно является понятием физическим. Поэтому, казалось бы, при изучении физики определённое внимание должно уделяться анализу данного понятия. Насколько мне известно, этого, к сожалению, обычно не делают.

Учитель. Школьная программа по физике не отводит времени для объяснения самого времени, эволюции этого понятия. По-видимому, предполагается, что школьники, приступая к изучению физики, уже имеют необходимые представления о том, что такое время.

Автор. Надо признать, что времени в определённом смысле не повезло. Мы живём во времени и пространстве. Пространство изучает специальная наука — геометрия. Время же — один из многих объектов изучения физики. В школьной физике ему просто не нашлось места. А между тем время — удивительнейший «объект», наводящий на глубокие размышления. Время *безостановочно* «течёт» и притом *только в одном направлении* — от прошлого к будущему. Настоящее — это, в сущности, неуловимое мгновение, разграничивающее прошлое и будущее. Реально именно это мгновение, эта грань между прошлым и будущим; вместе с ней мы все, весь наш мир непрерывно движемся в будущее, оставляя «позади себя» нарастающие «пласты» прошлого. Вот мы ожидаем некоторое событие; пока оно пребывает в будущем, ещё не произошло; но наступает момент — и событие совершается, теперь это уже история, которая со временем будет всё более отдаляться от нас в прошлое. Недаром говорят о «неумолимом ходе времени». Недаром возникает безотчётное желание остановить этот ход («Мгновение, остановись!»). Недаром мы не расстаёмся с фантастическими мечтами о путешествии по времени; если невозможно обратить ход времени, то нельзя ли хотя бы в отдельных случаях двигаться навстречу этому «ходу — из будущего в прошлое? Каждое поколение людей зачитывается фантастическими романами о путешествиях по времени. Кто не читал «Машину времени» Г. Уэллса или «Конец вечности» А. Азимова?

Учитель. Конечно, всё это и удивительно, и увлекательно. Но, согласитесь, вокруг нас вообще очень много удивительного. Возможно ли всё это вместить в ограниченные рамки школьных программ?

Автор. Здесь не просто удивление. Когда мы следим, например, за событиями, описанными Азимовым в его фантастическом романе, мы фактически размышляем над проблемами *причинности*, взаимосвязи событий. Мы видим, как вмешательство в прошлое

приводит к изменениям в будущем. Фантастические экскурсы в прошлые столетия чреваты разрушением прежних связей, они изменяют историю, порождают новую реальность. Уже одно это говорит о принципиальной невозможности подобных путешествий.

Удивительны не только необратимость и неотвратимость хода времени. Не менее удивительно присущее человеку *чувство времени.* Опытный лектор не нуждается в часах — он и без них заканчивает лекцию как раз к звонку. Тренированный человек может приказать себе проснуться, скажем, в семь часов утра — и он действительно проснётся в это время. Создаётся впечатление что человек обладает своеобразными внутренними часами. Именно так и считают физиологи и психологи. Ритмично бьётся сердце, ритмично работает система дыхания, сравнительно недавно (около пятидесяти лет назад) были обнаружены ритмы головного мозга. Основоположник кибернетики Н. Винер (1894 – 1964) считал, что именно ритмы головного мозга объясняют нашу способность чувствовать время.

Учитель. Но «чувство времени» весьма субъективно. Для человека, увлечённого работой, время бежит быстро, тогда как для томящегося в вынужденном бездельи (например, в ожидании поезда на вокзале) время тянется долго.

Автор. Здесь соединяются воедино вопросы физики, физиологии, психологии. И это «соединение» представляет значительный интерес. Однако давайте ограничимся обсуждением времени с точки зрения только физики. Существенно, что физика времени (а значит, и само понятие времени) по мере развития науки эволюционировала. В отличие от классической физики, современная физика связывает теснейшим образом время с пространством.

Учитель. Вот это объединение пространства и времени и представляется мне по-настоящему удивительным.

Автор. Почему?

Учитель. Уж очень они *разные* — время и пространство. Пространство мы как бы видим, можем воспринимать его целиком. Времени мы не видим; хотя мы его и чувствуем, однако воспринимаем не целиком, а отдельными мгновениями или промежутками. Главное же, в пространстве можно перемещаться во всех направлениях; при желании мы можем переместиться в ту или иную точку пространства. Во времени же мы не можем произвольно перемещаться, не можем, по желанию, попасть в тот или иной момент в прошлом, совершить поездку в будущее и вернуться обратно.

Автор. Они, конечно, разные — время и пространство. Но, думаю, Вы согласитесь, что понятие времени формировалось у человека при помощи более доступного ему понятия пространства. «Сейчас» и «скоро» появились по образу и подобию понятий «здесь» и «близко».

Учитель. Это чисто психологические аналогии.

Автор. В физике время и пространство тоже всегда выступали, что называется, «рука об руку». Ещё античные учёные понимали, что время и пространство связаны друг с другом через движение. Лукреций считал, например, что вне движения или покоя тел время ощущаться не может, что *самого по себе* времени просто нет. Он писал:

Также и времени нет самого по себе, но предметы
Сами ведут к ощущенью того, что в веках совершалось,
Что происходит теперь и что воспоследствует позже.
И неизбежно признать, что никем ощущаться не может
Время само по себе, вне движения тел и покоя.

В знаменитых апориях Зенона (V в. до н. э.) нашла отражение диалектика движения — летящая стрела одновременно и находится и не находится в данный момент времени в данной точке пространства. Гегель связывал эту диалектику с непрерывностью времени и пространства: «... Двигаться означает быть в данном месте и в то же время не быть в нём, — следовательно, находиться в обоих местах одновременно; в этом состоит непрерывность времени и пространства, которая единственно только и делает возможным движе-

ние» [29, с. 131].

Учитель. Конечно, время и пространство взаимосвязаны через движение — достаточно взглянуть на график пути от времени. И всё же время и пространство выступают здесь как самостоятельные понятия.

Автор. Вы правы. До создания теории относительности время можно было рассматривать вне пространства, а пространство вне времени. Специальная теория относительности продемонстрировала приближённость такой точки зрения, потребовала рассмотрения пространства и времени *в едином комплексе*. Интересно, что пространственно-временной континуум был предложен как обобщение обычного трёхмерного пространства на четырёхмерное «пространство». Об этом хорошо сказано в книге «Физика времени»: «Идея относительности объединяет пространство и время, она присоединяет время к пространству в качестве нового, четвёртого измерения... Новое измерение — время — рассматривается как бы наравне с тремя пространственными измерениями, а вместе всё это четырёхмерное образование объявляется четырёхмерным пространством... Все отношения в таком четырёхмерном мире строятся по существу так же, как и пространственные отношения в обычном трёхмерном мире» [141, с. 14].

Учитель. Действительно, объединение времени и пространства происходило, так сказать, под «флагом пространства» как переход к качественно новому (*четырехмерному*) пространству. И всё же четвёртая координата этого пространства — время — принципиально отлична от пространственных координат. Достаточно вспомнить о необратимости и неотвратимости хода времени.

Автор. Безусловно. Впрочем, давайте обсудим по порядку, как происходила *эволюция понятия времени*. Начнём с того, каким представляется время в классической физике.

Учитель. В классической физике время *абсолютно*, оно всегда и везде течёт *одинаково*. Два события, одновременные в одной системе отсчёта, будут одновременны *вообще*. Слово «сейчас» имеет абсолютный смысл для всего мира — и для нас, и для далёких галактик.

Автор. Всё правильно. Однако ответ Ваш не полон. Классическая физика утверждает о времени следующее. Во-первых, время существует *само по себе*; ходу времени подчиняются все явления и тела, но сами они никакого воздействия на ход времени не оказывают. Время существует вне пространства, вне тел и явлений — оно *абсолютное*. Во-вторых, все моменты времени *физически равноправны: время однородно*. Его ход везде в мире одинаков. В-третьих, время простирается от настоящего *неограниченно* в прошлое и в будущее. Его ход *одинаково равномерен* в прошлом, настоящем, будущем. В-четвёртых, время *одномерно*.

Учитель. По-видимому, аналогичные замечания можно сделать и о свойствах пространства?

Автор. Вот Вы уже и сами заговорили о пространственно-временных аналогиях. Действительно, подобно времени, пространство в классической физика существует само по себе, оно вмещает все тела, даёт место всем явлениям, но не испытывает на себе никакого воздействия со стороны тел и явлений. Все точки пространства физически равноправны: пространство, как и время, *однородно*. Свойства пространства со временем *не изменяются*. В отличие от времени, пространство трёхмерно, так что можно говорить о разных направлениях в пространстве. Все направления в пространстве физически равноправны: пространство *изотропно*. Пространство не имеет границ, во всех направлениях оно простирается *неограниченно*. Заметим, наконец, что в классической физике пространство описывается *геометрией Евклида*.

А теперь обратимся к современной физике. Она рассматривает время и пространство в соответствии с выводами теории относительности.

Учитель. *В теории относительности время утрачивает и абсолютность, и самостоятельность*. Его нельзя рассматривать теперь вне пространства, вне конкретной системы отсчёта. Указывая момент времени, мы должны указать также, *где* находятся часы,

по которым отсчитывается время. *Ход времени в разных системах отсчёта различен*. В нашей системе отсчёта часы идут нормально, а вот часы в системе, проносящейся мимо нас с огромной скоростью, будут, с нашей точки зрения, отставать, идти медленнее.

Автор. Между прочим, физика элементарных частиц даёт прямое экспериментальное подтверждение этого вывода специальной теории относительности. Я имею в виду время жизни пионов. Пионы — нестабильные частицы, они живут очень недолго, а затем распадаются (точнее говоря, превращаются в другие частицы). Среднее время их жизни известно: $2,6\cdot10^{-8}\ c$. Именно таково это время для пионов, покоящихся относительно физической лаборатории. Если же пионы летят с большой скоростью, то распад их задерживается, время жизни увеличивается — с точки зрения наблюдателя, находящегося в лаборатории. Измеренное этим наблюдателем среднее время жизни пионов в пучке, мчащихся со скоростью около 0,9 скорости света, составило $5,7\cdot10^{-8}\ c$ — в полном согласии с теорией. Заметим, что если бы наблюдатель каким-то чудом оказался на одном из пионов пучка, то по его часам среднее время жизни пионов в пучке равнялось бы отнюдь не $5,7\cdot10^{-8}\ c$, а $2,6\cdot10^{-8}\ c$.

Учитель. Мне представляется особенно впечатляющим тот факт, что события, являющиеся одновременными для наблюдателя в одной системе отсчёта, *не будут одновременными* для наблюдателя в другой системе. Если одновременность не абсолютна, то, значит, не будет абсолютным и утверждение, что какое-то событие произошло раньше или позже другого события.

Автор. Тут требуется уточнение. Ранее на рисунке 2.3 был изображён световой конус для события *O*. События, попавшие внутрь нижней половины конуса (включая поверхность конуса), могут рассматриваться как события, которые произошли раньше события *O*, тогда как события в пределах верхней половины конуса являются более поздними событиями по отношению к событию *O*. Здесь хорошо видно, что для ответа на вопрос «позже или раньше?» необходимо принимать во внимание не только время, но и пространственные координаты событий.

Объединение времени и пространства в специальной теории относительности имеет действительно глубокий смысл. Ведь ответ на вопросы, связанные со временем, зависит от пространственных координат, а для получения ответа на вопросы, связанные с пространственными измерениями, надо выполнить измерения времени. Именно в этом и заключено объяснение относительности как размеров тела, так и промежутков времени. Напомним приводившиеся ранее слова Эйнштейна о том, что укорачивание движущегося тела с точки зрения неподвижного наблюдателя оказывается не таким уж странным, «поскольку размеры тела можно определить только с помощью измерения времени».

Учитель. Раньше мы говорили о том, что путешествия во времени человеку заказаны. Однако в литературе по теории относительности часто приводят пример, когда человек, при желании, может перенестись в будущее быстрее, чем это происходит естественным путём. Так, он может, состарившись всего на несколько лет, перенестись на несколько десятилетий в будущее. Правда, без возвращения назад.

Автор. Вы говорите об известном *парадоксе близнецов*. Один из близнецов отправляется в дальний космический полёт на корабле, способном лететь с околосветовой скоростью; другой остаётся на Земле. Возвратившись на Землю после нескольких лет полёта (эти несколько лет отмерялись по часам на корабле), молодой космонавт обнаруживает, что на Земле прошло несколько десятков лет, его встречает состарившийся брат.

Учитель. Признаюсь, этот парадокс близнецов представляется мне и в самом деле парадоксом. Ведь если с точки зрения землян часы на корабле, а также все процессы на корабле шли медленнее, чем на Земле, то точно так же с точки зрения космонавтов шли медленнее часы и все процессы на Земле.

Автор. В действительности парадокса нет. Чтобы понять это, надо обратиться к общей теории относительности, согласно которой на ход времени оказывает влияние тяготе-

ние или, что эквивалентно, ускорение. Чем сильнее тяготение (ускорение), тем медленнее идёт время. В отличие от близнеца, остававшегося на Земле, близнец-космонавт испытывал ускорение (перегрузки); ведь, отправившись с Земли в далёкий космос, он должен был возвратиться обратно, поэтому его движение в целом нельзя считать равномерным прямолинейным. Ускорения, испытываемые космонавтом при разгоне до околосветовой скорости, при развороте на обратный курс, при торможении перед встречей с Землёй, как раз и приведут не к относительному, а к абсолютному замедлению хода времени в системе отсчёта космонавта.

Подводя итоги, изложим вкратце, как эволюционировало понятие времени. Сначала, в эпоху классической физики, время считалось абсолютным и было связано с пространством только через движение. Затем, после создания специальной теории относительности, обнаружилась *относительность* времени, его внутренняя органическая *связь с пространством*; оказалось, что время «здесь» отличается от времени «там». Наконец, с созданием общей теории относительности была выявлена *связь пространства-времени с материей*, с создаваемым ею *полем тяготения*. Современная физика показала, что укоренившееся в нашем сознании представление об абсолютном времени (равно как и об абсолютном пространстве), на которое ничто не может влиять, есть приближение, работающее в привычном для нас мире, но непригодное при переходе к космическим масштабам и околосветовым скоростям.

Учитель. Итак, приближённым оказалось представление классической физики о времени, существующем абсолютно, независимо от пространства, о времени, не подверженном какому-либо воздействию. Но классическая физика, как Вы сами же отмечали, рассматривала и другие свойства времени: его однородность, неограниченность, одинаковую равномерность хода в прошлом, настоящем, будущем. Следует ли считать, что эти свойства времени признаёт также и современная физика?

Автор. Вряд ли сегодня можно говорить о безоговорочном признании упомянутых свойств. Сомнения появились в 20-х годах, когда А. А. Фридман (1888 – 1925), воспользовавшись уравнениями общей теории относительности и предположив, подобно Эйнштейну, что пространство однородно и изотропно, попробовал рассчитать *поведение Вселенной во времени*. Любопытно, что сам Эйнштейн подобной задачи не рассматривал — он заранее был убеждён, что Вселенная в целом *статична*. Фридман обнаружил, что Вселенная вовсе не статична, она должна либо *сжиматься*, либо *расширяться* как целое. В 1929 г. Э. Хаббл (1889 – 1953), изучая спектры галактик, обнаружил в этих спектрах систематическое красное смещение. Стало ясно, что галактики разбегаются от земного наблюдателя, что соответствует *расширению Вселенной в целом*. Так возникла и вскоре получила всеобщее признание концепция *космологического расширения*. Центральный момент этой концепции — *Большой взрыв*, положивший начало расширению Вселенной; он произошёл примерно 20 млрд. лет назад. Об этом мы подробнее поговорим позднее. Пока же заметим лишь, что концепция космологического расширения, естественно, требует более осторожного подхода к представлению о неограниченности и однородности времени.

Учитель. Должен признать, что все эти вопросы следовало бы в той или иной мере рассматривать при изучении физики в школе. Они затрагивают весьма существенные аспекты *миропонимания*.

Автор. Если говорить о миропонимании, то, думаю, на уроках физики следовало бы затронуть ещё одну сторону времени — его *связь с энергией*. Это позволило бы по-новому, с более общей точки зрения рассмотреть закон сохранения энергии.

Учитель. Это крайне интересно.

Автор. В 1918 г. математик Э. Нётер (1882 – 1935) доказала, что *закон сохранения энергии есть следствие однородности времени*, иначе говоря, следствие того факта, что все моменты времени физически равноправны. Физическое равноправие различных моментов времени означает, что законы природы одни и те же для разных моментов, что они со временем не изменяются. Это обстоятельство весьма фундаментально. Именно поэто-

му, утверждает Нётер, и фундаментален закон сохранения энергии.

Учитель. Получается, что вечный двигатель невозможен по той причине, что законы природы не меняются со временем?

Автор. Именно так. И надо признать, что причина эта весьма основательна. Следует добавить, что *следствием однородности пространства является закон сохранения импульса,* а *следствием изотропности пространства — закон сохранения момента импульса*.

Учитель. Упомянутые свойства симметрии пространства и времени (однородность и изотропность пространства и однородность времени) принимались *безоговорочно* только в классической физике. Можно ли считать, что современная физика допускает возможность отказа от соответствующих законов сохранения?

Автор. В обычных масштабах, в обычном для нас мире свойства симметрии пространства и времени не вызывают сомнений, а значит, не вызывают сомнений и законы сохранения. Иное дело космические масштабы. Момент Большого взрыва, безусловно, есть физически выделенный момент времени. О каком законе сохранения энергии можно говорить применительно к началу космологического расширения? Какой смысл может иметь подсчёт энергетического баланса для акта Большого взрыва? Можно ли вычислить энергию поля тяготения, когда движение происходит в искривлённом этим тяготением пространстве? Все эти затруднения выглядят весьма принципиальными.

Учитель. Получается, что закон сохранения энергии не является абсолютно универсальным. Не страшен ли такой вывод?

Автор. На этот счёт хорошо сказано в уже упоминавшейся книге: «Выше мы говорили о хаосе, который воцарился бы в нашей жизни, не будь закона сохранения энергии. В жизни Вселенной этого закона нет. Законы природы не обязаны быть одинаковыми во все времена. Но это не означает всеобщего хаоса в мире. Ведь эти законы изменяются не произвольно: существуют «законы изменения законов природы». Общая теория относительности даёт этому замечательный пример» [141, с. 172].

Учитель. Разговор о времени получился очень насыщенным.

Автор. И всё же он далеко не завершён. В своё время мы поговорим о действующих в микромире *соотношениях неопределённостей* для энергии-времени и в связи с этим познакомимся с новым взглядом на сущность физического вакуума. Но и сказанного, думаю, хватит, чтобы почувствовать важность и глубину понятия «время». Нужны ли дополнительные аргументы в пользу рассмотрения этого понятия в школьном курсе физики?

§ 7. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА: РОЖДЕНИЕ И СТАНОВЛЕНИЕ

Что такое квантовая физика? Впитав в себя идеи теории относительности (невозможность передачи сигналов со скоростью больше скорости света в вакууме, взаимосвязь массы и энергии, инвариантность физических законов относительно перехода из одной инерциальной системы в другую и т. п.), физика XX столетия развивалась далее под флагом *квантовой теории*. В определённом смысле практически вся современная физика — это квантовая физика. Её рождение и развитие может рассматриваться как основной итог «новейшей революции в естествознании». Здесь произошло подлинное *объединение диалектики и естествознания*, возникли новые идеи, новая методология. Квантовая физика произвела переоценку роли динамических и статистических закономерностей (в пользу примата последних), потребовала изменения самого характера физических моделей, переосмысления роли исследователя в изучаемом им мире, отказа от многих привычных понятий и представлений.

Так что же такое *квантовая физика*? На данный вопрос нельзя ответить однозначно. Прежде всего, квантовая физика — это теория, описывающая свойства материи на уровне микроявлений; она исследует законы движения *микрообъектов.* Атомы, молекулы, элементарные частицы — основные «действующие лица» в квантовой физике.

Вместе с тем квантовая физика — это *теоретическая основа* современного учения о структуре и свойствах вещества и поля. По сравнению с классической физикой она рассматривает материю на более глубоком, *более фундаментальном* уровне. Она позволяет раскрыть многие «почему?», которые оставались без ответа в классической физике. Почему, например, алмаз твёрд? Почему электрическая проводимость полупроводника растёт с увеличением температуры? Почему магнит утрачивает свои свойства с нагреванием? На эти и многие другие подобные вопросы классическая физика ответа не даёт — здесь надо обращаться к квантовой теории. Классическая физика рассматривает различные параметры вещества (например, вязкость, удельную теплоёмкость, теплопроводность, диэлектрическую проницаемость, электрическую проводимость, показатель преломления) как параметры *эмпирические*: их значения для различных материалов определяются на основе измерений. Квантовая физика даёт возможность *рассчитать* физические параметры вещества. Отвечая на вопрос «что такое квантовая физика?», американский физик У. Лэмб заметил, что наиболее просто определить её как «науку, обеспечивающую нас удивительным набором правил расчёта определённых физических свойств вещества» [72, с. 719].

В каком отношении к классической физике находится квантовая физика? Прежде всего отметим, что квантовая физика содержит классическую как свой *предельный случай*; при переходе от микрообъектов к обычным объектам (будем называть их макрообъектами) законы квантовой физики превращаются в законы классической. Иногда говорят, что квантовая физика «работает» в *микромире*, а классическая — в *макромире*. Такое утверждение предполагает, что существуют некий отдельный «микромир» и некий «макромир». Правильнее говорить о существовании микрообъектов (микроявлений) и макрообъектов (макроявлений). Принципиально важно, что *в основе* макроявлений лежат микроявления, что макрообъекты *построены* из микрообъектов. Переход от классической физики к квантовой есть переход не из одного «мира» в другой, а от *менее* глубокого к *более* глубокому рассмотрению материи. Это означает, что, изучая поведение микрообъектов, квантовая физика рассматривает фактически те же самые макрообъекты, но на более фундаментальном уровне. Кроме того, следует помнить, что грань между микро- и макроявлениями в общем случае достаточно условна и подвижна. Классические представления нередко оказываются полезными при рассмотрении микроявлений, а квантовофизические — при рассмотрении макроявлений. Существует, наконец, специальный термин «квантовая макро-

физика», применяемый, в частности, к квантовой электронике, явлениям сверхтекучести и сверхпроводимости и в ряде других случаев.

Строго говоря, квантовая физика — не одна, а несколько наук. Науки эти вполне самостоятельны, хотя, надо подчеркнуть, грани между ними часто оказываются весьма неопределёнными. Фундаментом квантовой физики является *квантовая механика*, изучающая законы движения (законы механики) микрообъектов, строение и свойства атомов и молекул. К ней тесно примыкают *квантовая электродинамика* (изучает взаимодействие электронов и фотонов) и совсем недавно возникшая *квантовая хромодинамика* (изучает кварковую структуру элементарных частиц). Как от ствола дерева, от квантовой механики пошли многие «ветви», каждая из которых является сегодня вполне самостоятельной наукой: квантовая химия, квантовая теория твёрдого тела, квантовая электроника, теория атомного ядра и др. Обширный конгломерат наук, объединяемый общим термином «квантовая физика», служит теоретической базой для многих современных научно-технических направлений — таких, например, как *материаловедение* (включая синтез новых материалов с наперёд заданными свойствами), *электроника* (включая вычислительную технику и робототехнику), *атомная энергетика, лазерная техника*. Можно сказать, что квантовая физика — это *теоретическая база* научно-технического, прогресса.

Из огромного арсенала учебной и монографической литературы по квантовой механике выделим несколько книг, которые, как нам кажется, будут полезны учителям физики [135, 61, 132, 9, 42, 73, 138]. Укажем также работы автора [117, 122, 123, 115], где достаточно подробно освещены многие вопросы, затрагиваемые в данном и следующем параграфах. Наконец, посоветуем нашим читателям познакомиться с работами выдающихся физиков нашего времени, стоявших у истоков квантовой механики — М. Планка [94, с. 282, 431, 568, 603, 613, 634], А. Эйнштейна [144, с 386, 393, 604, 612, 617], Н. Бора [11, с. 84, 12, с. 56, 75, 180, 204, 250, 280, 399, 181, 526, 540, 591], В. Гейзенберга [32, с. 62, 91, 107, 123].

Рождение. Годом рождения квантовой физики принято считать 1900 г. — когда Планк выдвинул предположение, что энергия теплового излучения тел испускается *прерывисто*, т. е. в виде *порций (квантов)*. Энергия кванта равна $h\nu$, где ν — частота излучения, h — введённая Планком универсальная постоянная ($h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ $Дж \cdot c$). Эта постоянная была позднее названа *постоянной Планка*; сам Планк рассматривал её как «квант действия», так как она имеет такую же размерность, что и физическая величина, называемая действием.

Идея Планка о *прерывистости* процесса испускания излучения телами позволила разрешить острую проблему, связанную с тепловым излучением. Дело в том, что плотность энергии излучения, вычисленная на основе классической теории, обращалась в *бесконечность* после интегрирования по всем частотам. Согласно же полученной Планком формуле плотность энергии излучения оказывалась *конечной* и притом согласующейся с экспериментом. Формула Планка работала прекрасно, однако лежащая в её основе идея представлялась всем в то время, включая и самого Планка, весьма экстравагантной. Как писал Планк, «или квант действия был фиктивной величиной — тогда весь вывод закона излучения был принципиально иллюзорным и представлял просто лишённую содержания игру в формулы, или же при выводе этого закона в основу была положена правильная физическая мысль — тогда квант действия должен был играть в физике фундаментальную роль, тогда появление его возвещало нечто совершенно новое, дотоле неслыханное, что, казалось, требовало преобразования самих основ нашего физического мышления, покоившегося со времён обоснования анализа бесконечно малых Ньютоном и Лейбницем на предположении о непрерывности всех причинных связей» [94, с. 608]. Время подтвердило глубину физической интуиции Планка. Постоянная Планка вошла в физику как одна из важнейших постоянных.

Планк полагал, что излучение прерывисто лишь испускается, а поглощается непрерывно. Эйнштейн пошёл дальше и, распространив идею прерывистости также и на по-

глощение излучения, объяснил в 1905 г. проблемы, возникшие в связи с исследованиями *фотоэффекта*. Согласно Эйнштейну, при облучении вещества светом электроны вещества поглощают энергию света порциями; фотоэффект наблюдается, если энергия $h\nu$ порции больше работы выхода A для данного материала (больше той наименьшей энергии, какую надо сообщить электрону для того, чтобы он смог покинуть вещество). Эйнштейн предложил простую формулу для кинетической энергии E_k фотоэлектрона, поглотившего квант $h\nu$:

$$E_k = h\nu - A \qquad (1)$$

В результате получили объяснение недавние загадки фотоэффекта: существование красной границы фотоэффекта, зависимость энергии фотоэлектрона не от интенсивности света, а от его частоты.

Если энергия излучения и испускается, и поглощается порциями, то естественно, казалось бы, предположить, что само излучение имеет *дискретную структуру* — состоит из *квантов*. Но как тогда быть со *световыми волнами*? Недаром прошло более десяти лет, прежде чем Эйнштейн всё же сформулировал идею «световых квантов», названных позднее фотонами; в 1916 г. он предложил связывать со световым квантом энергию $h\nu$ и импульс $h\nu / c$. Прямое экспериментальное подтверждение существования *световых квантов (фотонов)* было получено в 1923 г. в опытах Комптона и в 1926 г. в опытах Боте. Таким образом, понадобилась четверть века для того, чтобы идея Планка получила логическое завершение. Идеи рождавшейся квантовой физики с большим трудом утверждались в сознании ученых. «Квантовая теория Планка, — писал В. Гейзенберг, — была в ту эпоху, собственно, вовсе не теорией, а занозой в учёных умах. В плотно сбитое строение классической физики она внесла идеи, во многих отношениях чреватые трудностями и противоречиями» [32, с. 62].

Рождение квантовой физики предопределялось не только исследованиями по тепловому излучению и фотоэффекту. Большую роль сыграли также исследования, проводившиеся в двух других областях — по *спектроскопии газов* и по *изучению строения атома*. Ещё в конце XIX в. было установлено, что спектры испускания свободных атомов не непрерывны, а состоят из упорядоченных *наборов линий* (*линейчатые* спектры). Оказалось, что каждый химический элемент характеризуется *собственным* набором спектральных линий. Этот набор распадается на несколько *серий*. Для атомарного водорода, например, разные серии описываются следующей формулой:

$$\nu_n = cR\left(\frac{1}{s^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (2)$$

Здесь ν_n — дискретные частоты спектра (частота спектральных линий), R — *постоянная Ридберга* ($R = 1{,}1 \cdot 10^7$ $м^{-1}$), s и n — целые положительные числа. Числа s фиксируют ту или иную серию, а n фиксируют линию в серии; для каждой серии $n > s$. При $s = 1$ получаем серию Лаймана, при $s = 2$ — серию Бальмера (она попадает в область видимого спектра), при $s = 3$ — серию Пашена и т. д. Изучив закономерности в спектрах различных газов, В. Ритц (1878 – 1909) сформулировал в 1908 г. *комбинационный принцип,* согласно которому всякую новую линию в спектре данного элемента можно вывести из ранее известных, комбинируя их в виде сумм и разностей. Богатый экспериментальный материал по атомным спектрам, накопленный к началу XX в., не находил объяснения в рамках классической физики. Почему спектры свободных атомов линейчатые? Чем объясняются наблюдаемые закономерности в спектральных линиях? Как объяснить комбинационный принцип Ритца? Как устроен атом и как связаны с его строением закономерности в спектре? На все эти вопросы классическая физика ответа не давала. Не был известен физический механизм испускания света атомом. Было неясно, в частности, что именно испускает отдельный атом: сразу все линии в спектре данного элемента или только одну линию из

спектра. Согласно классической электродинамике испускание излучения происходит вследствие колебаний заряда (вибратор Герца), причём частота излучения *равна* частоте, с какой колеблется заряд. Неудивительно, что одна из первых моделей атома — модель Дж. Дж. Томсона — представляла излучающий атом в виде *осциллятора*. Согласно этой модели, предложенной в 1903 г., атом водорода выглядел как равномерно заряженный положительным электричеством шар, в центре которого находится электрон. При колебаниях электрона относительно центра шара атом излучает. Правда, непонятно было, почему электрон мог колебаться с разными и притом дискретными частотами, описываемыми формулой (2).

На основании известных опытов по рассеянию α-частиц при их прохождении сквозь тонкие фольги Резерфорд пришел в 1911 г. к выводу о существовании в центре атома положительно заряженного малого ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Модель Томсона оказалась несостоятельной; её сменила *планетарная модель* атома, которую Резерфорд окончательно сформулировал к 1913 г. На первый взгляд, такая модель не противоречит представлениям об осциллирующем электроне: движение электрона по окружности вокруг ядра можно рассматривать как суперпозицию колебаний, происходящих во взаимно перпендикулярных направлениях. Беда, однако, в том, что если в модели Томсона электрон колеблется лишь *тогда*, когда действует внешнее возбуждение, а в невозбуждённом атоме покоится в центре атома, то в случае планетарной модели упомянутые взаимно перпендикулярные колебания должны совершаться *постоянно*. А это означает, что атом должен постоянно испускать излучение. Непрерывно теряя энергию на излучение, электрон будет по спирали приближаться к ядру и в конце концов упадёт на него. Таким образом, по законам классической электродинамики атом вообще не мог бы сколь-либо долго существовать. При этом за время своего короткого существования он должен был бы непрерывно испускать излучение с непрерывно изменяющейся частотой.

Первые шаги: теория атома водорода по Бору; **взаимодействие излучения с атомами по Эйнштейну.** В истории квантовой физики особое место занимают работа Н. Бора «О строении атомов и молекул» (1913) и две работы А. Эйнштейна «Испускание и поглощение излучения по квантовой теории» и «К квантовой теории излучения» (1916).

Нильс Бор (1885 – 1962) усмотрел глубокую связь между линейчатой структурой атомных спектров и идеями Планка и Эйнштейна о дискретном характере процессов испускания и поглощения света атомами. Исходя из планетарной модели, он в своей работе развил *теорию атома водорода*. Теория Бора хорошо известна; она излагается во всех курсах физики. Напомним вытекающие из неё основные формулы. Электрон в атоме водорода может находиться, по Бору, лишь на определённых (дозволенных) орбитах, имеющих радиус

$$r_n = \frac{h^2 n^2}{4\pi^2 m e^2}, \quad n = 1, 2, 3, \ldots \tag{3}$$

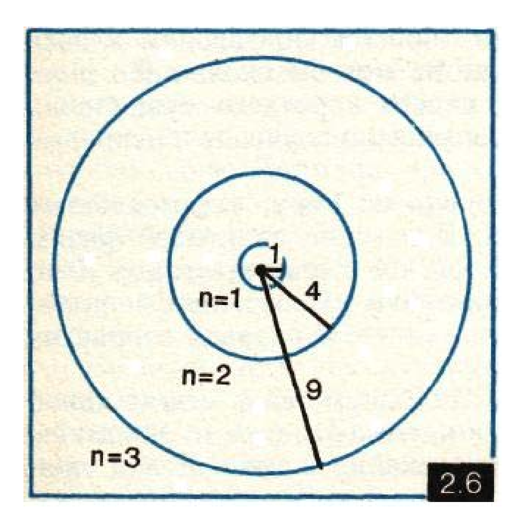
(m и e — масса и заряд электрона). Скорость электрона на n-*й* орбите

$$v_n = \frac{2\pi e^2}{hn}, \tag{4}$$

а полная (кинетическая плюс потенциальная) энергия

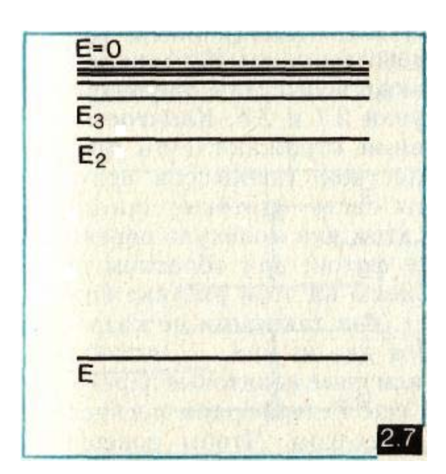
$$E_n = -\frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 n^2}. \tag{5}$$

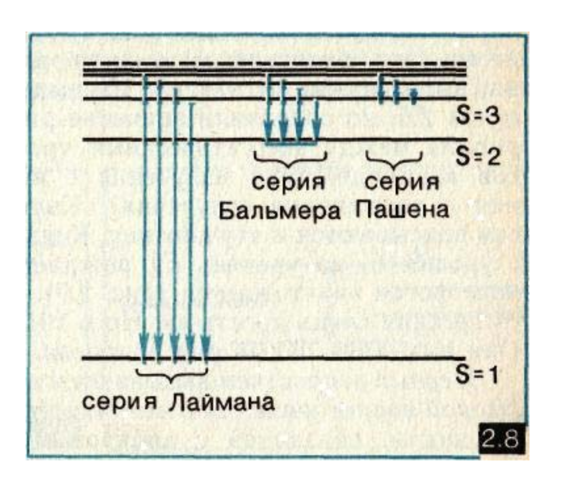
Отрицательность энергии означает, что электрон находится в связанном состоянии (за нуль принимается энергия свободного электрона). На рисунке 2.6 показаны определяемые по формуле (3) электронные орбиты для нескольких первых значений n, а на рисунке 2.7 изображены энергетические уровни, определяемые формулой (5).



Электронные орбиты в атоме — архаизм, от которого следовало бы отказаться при преподавании физики. Их можно было бы использовать лишь при очень больших числах *n,* однако насколько же велик должен быть у таких орбит радиус!

Эти результаты Бор получил, используя, во-первых, второй закон Ньютона для заряда, движущегося по окружности под действием кулоновской силы ($mv_n^2 / r_n = e^2 / r_n^2$), и, во-вторых, условие квантования момента импульса электрона ($mv_n r_n = nh / 2\pi$). Последнее условие Бор вывел, исходя из идеи Планка о том, что возможны лишь те состояния гармонического осциллятора, энергия которых равна $nh\nu$, и обобщив сформулированное для осциллятора правило квантования на другие механические модели и, в частности, на тело, движущееся по круговой орбите.





В основе теории Бора лежат два постулата. *Первый постулат* вводит понятие «дозволенная орбита». Это есть орбита, находясь на которой электрон, вопреки требованиям классической электродинамики, не излучает. Таким орбитам отвечают *стационарные состояния* атома и определённые уровни его энергии. *Второй постулат* утверждает, что испускание или поглощение света происходит при переходе электрона с одной дозволенной орбиты на другую или, иными словами, при переходе атома с одного энергетического уровня на другой. Эти переходы называют квантовыми. При каждом таком переходе испускается (поглощается) один фотон; его энергия $h\nu$ равна разности энергий соответствующих уровней. Если, например, происходит квантовый переход с уровня E_n на уровень E_s (пусть $E_n > E_s$), то испускается фотон с энергией

$$h\nu = E_n - E_s \qquad (6)$$

Соотношение (6) известно как *правило частот* Бора. Оно представляет собой «серд-

цевину» теории Бора. Во-первых, из него следует, что частота испускаемого атомом излучения *не зависит* от частоты вращения электрона по орбите (от частоты колебаний, соответствующих движению по орбите), а определяется просто разностью энергий соответствующих уровней. Известно восклицание Эйнштейна, ознакомившегося с работой Бора: «Но в таком случае частота света совершенно не зависит от частоты электрона! Это же колоссальное открытие!» Во-вторых, правило частот ярко демонстрирует *дискретность* процесса испускания или поглощения излучения атомом. Вместо непрерывного, требующего какого-то времени процесса испускания или поглощения электромагнитной волны происходит мгновенный акт рождения или уничтожения фотона, при этом состояние атома *скачкообразно* изменяется. В зависимости от того, между какой парой уровней данного атома совершился квантовый переход, рождается (уничтожается) фотон, вносящий вклад в ту или иную линию спектра испускания (поглощения). В-третьих, правило частот объяснило не только линейчатый характер атомных спектров, но и наблюдаемые *закономерности* в структуре этих спектров. Рассмотрим спектр атомарного водорода. Подставляя (5) в (6), находим

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3}\left(\frac{1}{s^2} - \frac{1}{n^2}\right) \tag{7}$$

В результате приходим к закономерности (2) и одновременно получаем выражение, позволяющее *вычислить* постоянную Ридберга!

$$R = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3 c} \tag{8}$$

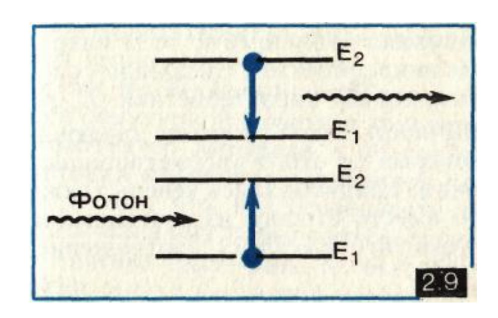
Вычисленное по этой формуле значение постоянной Ридберга прекрасно согласуется с измеренным значением.

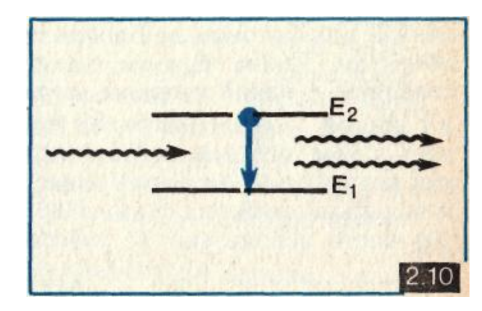
На рисунке 2.8 стрелками показаны квантовые переходы в атоме водорода, соответствующие спектральным сериям Лаймана, Бальмера и Пашена.

Теорию Бора рассматривают как один из *первых этапов* в развитии квантовой физики и при этом отмечают её непоследовательность, проявляющуюся в том, что здесь наряду с условием квантования используется и чисто классическое соотношение — второй закон Ньютона. Указанная непоследовательность связана с присутствием в модели атома электронных орбит. Орбиты не согласуются с существованием дискретных дозволенных значений энергии электрона в атоме. В этом легко убедиться, поставив вопрос: чему равна энергия электрона в тот, хотя и короткий, но конечный промежуток времени, когда с исходной орбиты электрон уже ушёл, а на конечную орбиту ещё не прибыл? Ведь не может же он *мгновенно* преодолеть расстояние между орбитами! Подчеркнём, что в последовательной квантовой теории *электронных орбит в атоме попросту нет*. К сожалению, этот архаизм оказался необычайно живучим — по сей день электронные орбиты «украшают» страницы многих книг по физике, для большинства наших современников электронные орбиты продолжают служить образом атома.

И всё же теория Бора интересна не только в историческом плане. Эта теория обладает непреходящей ценностью; недаром она позволила вычислить постоянную Ридберга. Ценность теории Бора — в правиле частот (6). Электронных орбит нет, но есть стационарные состояния и соответствующие им энергетические уровни атома (это убедительно доказали знаменитые опыты Франка и Герца, выполненные в 1914 г.). Не выдержал испытания временем рисунок 2.6, но сохранили значение рисунки 2.7 и 2.8. *Квантовые переходы* между энергетическими уровнями отражают суть процессов взаимодействия излучения с веществом (процессов испускания и поглощения излучения). Кванты света (фотоны) органически вписываются в эту картину. Когда атом или молекула переходит с уровня E_2 на уровень E_1, рождается фотон; при обратном переходе фотон уничтожается (рис. 2.9). Схемы на этом рисунке кажутся сегодня очень простыми. Но в 1913 г. они таковыми не казались.

Они вызывали целый ряд вопросов. Вот два из них.





Первый вопрос: чем вызываются те или иные квантовые переходы? *Второй вопрос* касается отмечавшейся ещё Резерфордом логической трудности, связанной с квантовым переходом. Чтобы совершить переход между двумя данными уровнями, атом должен поглотить или испустить фотон определённой, а не какой-либо иной энергии. Каким же образом атом производит «выбор» фотона нужной энергии? Ответ на первый вопрос мы находим в упомянутых ранее работах Эйнштейна 1916 г. Ответ на второй вопрос был найден позднее в 20-х годах.

Прежде всего отметим, что Эйнштейн исходил из *вероятностной природы квантовых переходов*: он пишет о *вероятности* того или иного перехода. Вероятностный подход к атомным процессам был предопределён, по сути дела, уже при рождении квантовой физики — когда Планк предложил рассматривать испускание излучения как *прерывистый* процесс. Как отмечал Гейзенберг, «этот прерывистый, скачкообразный характер испускания... приводит к предположению, что излучение представляет собой статистический феномен» [32, с. 127].

Эйнштейн рассмотрел задачу о взаимодействии равновесного излучения с равновесным коллективом атомов, способных испускать и поглощать излучение. Для простоты, атомы имеют всего два уровня энергии E_1 и E_2, а излучение имеет частоту $\nu_{12} = (E_2 - E_1)/h$. Существуют три фундаментальных процесса взаимодействия атомов с излучением. Первый процесс — *спонтанное испускание* излучения атомами: атомы самопроизвольно (спонтанно) переходят с уровня E_2 на уровень E_1, испуская фотон с энергией $h\nu_{12}$. Самопроизвольность процесса означает, что он не зависит от каких-либо внешних факторов, с помощью которых им можно было бы управлять. Данный процесс напоминает радиоактивный распад атомного ядра; он имеет ярко выраженный *случайный* характер. Случаен момент испускания спонтанного фотона, случайно направление его движения. Второй процесс — *индуцированное (вынужденное) испускание* излучения атомами, оно происходит под действием электромагнитного излучения частоты ν_{12}. Фотон с энергией $h\nu_{12}$ *инициирует* квантовый переход атома с уровня E_2 на уровень E_1, в результате появляется ещё один фотон с энергией $h\nu_{12}$. Вероятность данного процесса *пропорциональна плотности излучения*, инициирующего рассматриваемый процесс. Эйнштейн ввёл индуцированное испускание, чтобы согласовать получающиеся результаты с формулой Планка (той самой, которую получил Планк ещё в 1900 г.). При этой Эйнштейн показал, что излучение, испущенное при вынужденных переходах, должно иметь *точно такие же характеристики*, что и первичное излучение, инициировавшее эти переходы, — такую же частоту, фазу, поляризацию, такое же направление распространения. На фотонном языке это означает, что вторичный фотон (фотон, родившийся при вынужденном переходе) является точной копией первичного фотона; оба фотона находятся *в одном и том же состоянии*. Наконец, третий процесс — *поглощение* излучения атомами. Как и в случае вынужденного испускания, вероятность этого процесса пропорциональна плотности электромагнитного излучения. В верхней части рисунка 2.9 изображён элементарный акт спонтанного испускания, а в нижней части рисунка — поглощения. Элементарный акт вынужденного испус-

кания изображён на рисунке 2.10. Отмечая важность работ Эйнштейна для развития квантовой теории, Гейзенберг писал, что после этих работ «внимание всё более смещалось с энергии стационарных состояний к вероятности перехода из одного стационарного состояния в другое» [32, с. 96]. Квантовая физика постепенно взрослела. Она вступала в период своего становления, который датируют 1923 – 1927 гг.

От волн материи к волнам вероятности; уравнение Шрёдингера и волновая функция. Развитие фотонных представлений привело к всеобщему признанию в начале 20-х годов идеи *корпускулярно-волнового дуализма для* электромагнитного излучения. С излучением, имеющим частоту ν и волновой вектор $\vec{k}$ (напомним: $k = \dfrac{2\pi}{\lambda} = \dfrac{2\pi\nu}{c}$, где λ — длина волны излучения), можно сопоставить поток фотонов, имеющих энергию E и импульс p, определяемые соотношениями:

$$E = h\nu, \qquad \vec{p} = \frac{h}{2\pi}\vec{k}. \tag{9}$$

С учётом того, что $k = 2\pi\nu / c$, получаем из (9):

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c}. \tag{10}$$

Обратим внимание на то, что равенство $p = E / c$ для фотона согласуется с соотношением (11) из § 6, если учесть, что масса покоя фотона равна нулю.

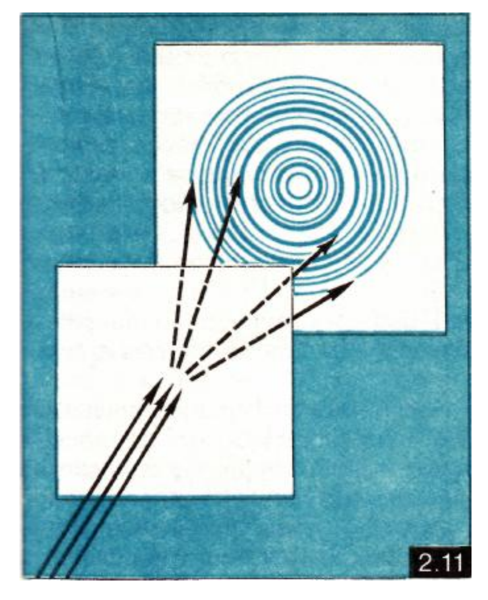
В 1924 г. Луи де Бройль (1892 – 1987) предложил распространить идею корпускулярно-волнового дуализма не только на излучение, но и вообще на все микрообъекты. Соотношения (9), установленные для фотонов, де Бройль предложил применить ко всем микрообъектам. Таким образом, с любым микрообъектом следовало сопоставлять, с одной стороны, *корпускулярные* характеристики (E, $\vec{p}$), а с другой — *волновые* (ν, $\vec{k}$). Необычность такой гипотезы заключалась в том, что микрообъектам, которые до этого рассматривались как корпускулы, например электронам, приписывались теперь также и волновые свойства. Заметим, что вместо второго из соотношений (9) часто используют (с учётом того, что $k = 2\pi / \lambda$) соотношение:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \tag{11}$$

В случае фотонов λ есть длина волны излучения; в применении же к микрообъектам, имеющим массу покоя, величину λ стали называть «дебройлевской длиной волны» микрообъекта.

Однако как понимать наличие у микрообъекта, например электрона, волновых свойств? Что такое «дебройлевская волна»? Насколько она реальна? Надо сказать, что де Бройль, а также многие другие физики считали в то время эти волны *реальными* волнами, и какой-то мере аналогичными электромагнитным волнам. В 1925 г. де Бройль предложил термин «волны материи»; для математического описания этих волн он ввёл величину, названную им *волновой функцией*. В 1927 г. в опытах Дэвиссона и Джермера и независимо от них П. С. Тартаковского была обнаружена *дифракция электронов*. Дебройлевские «волны материи» электронов дифрагировали на кристаллической решётке мишени и создавали на экране характерную картину дифракционных колец (рис. 2.11). Измерения расстояний между кольцами для электронов заданной энергии подтверждали формулу де Бройля (11). Эти опыты рассматривались как убедительное доказательство существования «волн материи», хотя физическая сущность таких волн оставалась непонятной. С появлением гипотезы де Бройля и особенно после упомянутых опытов стала весьма популярной *волновая концепция* в квантовой теории. Физику микрообъектов называли в те годы *волновой механикой* (термин «квантовая механика» закрепился позднее). Существовала

уверенность в том, что все особенности физики микрообъектов *можно свести* к наличию у них волновых свойств.



В течение 1925 – 1926 гг. был фактически создан *аппарат* квантовой механики (волновой механики). Первый шаг сделал в 1925 г. В. Гейзенберг (1901 – 1976). Он разработал *матричный вариант* квантовой механики (квантованная величина представлялась в вида некоторой матрицы, диагональные элементы которой — наблюдаемые в опыте значения этой величины; соотношения между матрицами соответствовали классическим соотношениям для рассматриваемых величин с учётом возможности некоммутативности произведения матриц). В 1926 г. в работе «О квантовании как задаче о собственных значениях» Э. Шрёдингер (1887 – 1961), используя волновые представления, предложил своё знаменитое дифференциальное уравнение для волновой функции де Бройля (известное теперь как *уравнение Шрёдингера*). Проблему вычисления энергетических уровней связанного микрообъекта Шрёдингер сводил к проблеме нахождения *собственных значений*.

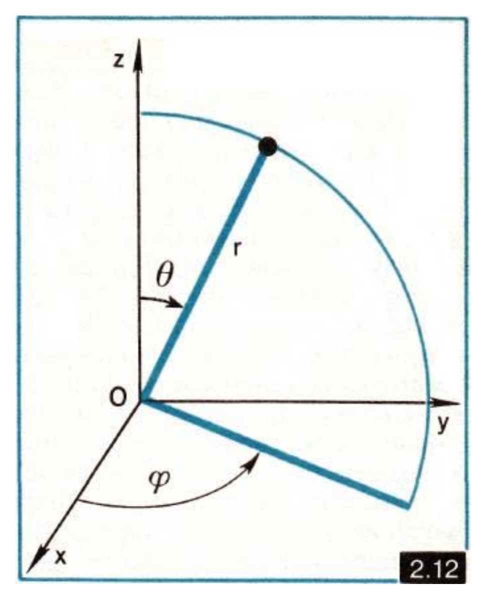
Работа Шрёдингера имела большой резонанс. Вот как описывает события тех исторических дней Гейзенберг: «1926 г. начался с сенсации. Сначала по слухам, а затем в виде корректурных листов мы получили сведения о первой работе Шрёдингера по волновой механике, где задача определения энергетических уровней в атоме водорода решалась просто как проблема отыскания собственных значений для трёхмерных материальных волн. Физическая картина, из которой исходил Шрёдингер, принадлежала Луи де Бройлю и выглядела совершенно иначе, чем принятая нами за основу атомная модель Бора. Но результаты получались те же самые, и важные формальные аналогии были налицо. Понятие электронной орбиты у Шрёдингера отсутствовало точно так же, как и в геттингенской квантовой механике (в варианте квантовой механики, разработанной Гейзенбергом. — *Авт.*), и в обеих теориях определение энергетических уровней стационарных состояний сводилось к проблеме собственных значений в линейной алгебре. Подозрение, что обе теории математически эквивалентны, т. е. допускают взаимное преобразование, возникло очень скоро и обсуждалось повсеместно» [32, с. 73]. Математическая эквивалентность *волновой механики Шрёдингера* и *матричной механики Гейзенберга* была доказана в том же 1926 г. в новой работе Шрёдингера. Иначе обстояло дело с физической интерпретацией; здесь обнаружились весьма принципиальные расхождения. Предоставим слово Гейзенбергу: «Шрёдингер понимал тогда свои волны как настоящие трёхмерные материальные волны — сравнимые, скажем, с электромагнитными волнами — и намеревался полностью изгнать из квантовой теории черты прерывности, в особенности так называемые квантовые переходы. Я протестовал против этого при обсуждении доклада, поскольку, как я понимал, на таком пути невозможно объяснить даже закон теплового излучения Планка. Но к согласию тогда прийти не удалось, и другие физики в своём большинстве надеялись

вместе со Шрёдингером, что квантовых переходов можно как-нибудь избежать. Потом в сентябре в Копенгагене состоялась подробная дискуссия между Бором и Шрёдингером, растянувшаяся, насколько я помню, более чем на неделю; я участвовал в ней так долго, как было возможно. Споры были страстными, и разногласия доходили до обидных упрёков. В конце концов мы, копенгагенцы, убедились, что шрёдингеровская интерпретация несостоятельна, и что квантовые переходы являются существенной частью внутриатомных процессов» [32, с. 74].

Обратим внимание, в порядке отступления, на то, что двум весьма консервативно настроенным учёным суждено было внести особенно существенный вклад в «квантовофизическую революцию». Мы имеем в виду прежде всего М. Планка, выдвинувшего «безумную» идею прерывистости, дискретности, которая затем переросла в идею квантовых скачков. Сам Планк тяготился этой идеей, разрабатывал компромиссные варианты (полагал, например, что только испускание излучения происходит прерывисто, а поглощение совершается непрерывно), надеялся, что со временем можно будет избавиться от квантовых скачков. Далее мы имеем в виду Шрёдингера. Он предложил, можно сказать, самое главное уравнение квантовой механики и при этом верил, что его уравнение, наконец-то, покончит с квантовыми скачками. Вспомним известное восклицание Шрёдингера: «Если никак нельзя обойтись без этих проклятых квантовых скачков, то я жалею о том, что связался с атомной теорией!» Вспомним, как обрадовался Планк уравнению Шрёдингера, усмотрев в нём долгожданный возврат к физике непрерывного: «Что придаёт этому дифференциальному уравнению его основополагающее значение, так это меньше всего способ его вывода, а также вовсе не его физическая интерпретация, в деталях ещё не вполне ясная, но прежде всего то обстоятельство, что благодаря введению квантового закона в известную схему обычного дифференциального уравнения создаётся совсем новая методика, позволяющая с помощью математики преодолевать трудную квантовотеоретическую проблему. Это первый случай, когда квант действия, который до сих пор не поддавался никаким попыткам подойти к нему с точки зрения физики непрерывного, удалось включить в дифференциальные уравнения» [94, с. 399].

Но возврата к физике непрерывного, конечно, не произошло: квантованные значения различных величин (энергии, момента импульса и др.) естественным образом возникали в результате решения соответствующих уравнений Шрёдингера. «Проклятые квантовые скачки» с их неизбежной вероятностной трактовкой прочно утвердились в квантовой физике. Более того, сама волновая функция получила вероятностное толкование.

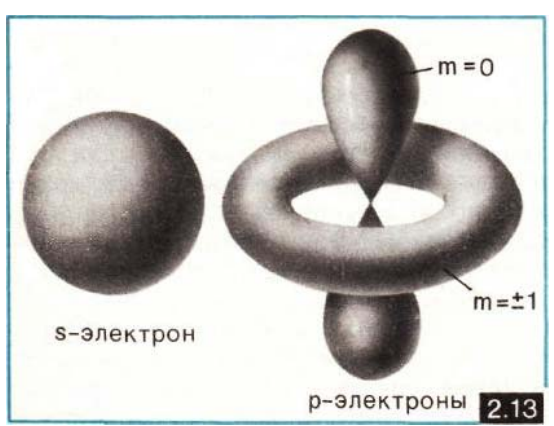
Вероятностную интерпретацию волновой функции предложил в 1926 г. М. Борн (1882 – 1970). В чём сущность этой интерпретации? Поясним её на следующем примере. Предположим, что в результате решения некоторого конкретного уравнения Шрёдингера получен дискретный спектр значений энергии микрообъекта: $E_1, E_2, E_3, \ldots$. Каждому из этих уровней энергии соответствует стационарное состояние, описываемое своей волновой функцией (она также определяется в результате решения уравнения Шрёдингера). Волновые функции: $\psi_1(x, y, z)$, $\psi_2(x, y, z)$, $\psi_3(x, y, z)$, … (x, y, z — координаты микрообъекта). Согласно Борну, величина $|\psi_n(x, y, z)|^2\, dV$ есть вероятность того, что микрообъект, находящийся в *n-м стационарном* состоянии, будет обнаружен в элементе объёма dV у точки с координатами x, y, z. *Квадрат модуля волновой функции выступает здесь как плотность вероятности*. Заметим, что в общем случае волновая функция имеет в качестве аргумента не обязательно пространственные координаты; если аргументом являются *дискретные* величины, то квадрат модуля волновой функции будет выражать не плотность вероятности, а *саму вероятность*. Так, он может описывать вероятность того, что в течение некоторого времени микрообъект продолжает оставаться на возбуждённом уровне (здесь просматривается связь волновой функции с вероятностью спонтанного квантового перехода с возбуждённого уровня на невозбуждённый).

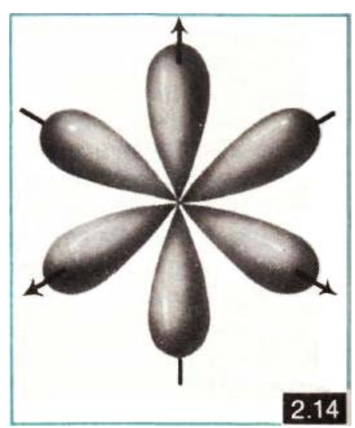


Возвращаясь к волновой функции, зависящей от пространственных координат, рассмотрим конкретный пример — *электрон в атоме*. Состояние электрона в атоме описывается, как известно, набором *квантовых чисел*. В набор входят *главное* квантовое число n ($n = 1, 2, 3, \ldots$), *орбитальное* квантовое число l ($l = 0, 1, \ldots, n-1$), *магнитное* квантовое число m ($m = -l, -l+1, \ldots, l-1, l$). Числа n и l определяют энергию электрона в атоме. Пусть электрон находится в состоянии, характеризуемом числами n, l, m; это состояние описывается волновой функцией $\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi)$, где в качестве пространственных координат выбраны для удобства не декартовы, а *сферические* координаты (рис. 2.12). Плотность вероятности найти рассматриваемый электрон в точке с координатами r, θ, φ есть

$$\rho(r,\theta,\varphi) = |\psi_{nlm}(r,\theta,\varphi)|^2 . \qquad (12)$$

Вместо электронной орбиты теперь рассматривается своеобразное «электронное облако», плотность которого в разных точках вокруг атомного ядра пропорциональна функции $\rho(r,\theta,\varphi)$. На рисунке 2.13 показаны формы таких «облаков» для электронов с $l = 0$ (их называют s-электронами) и с $l = 1$ (p-электроны). Заметим, что если атом рассматривается не свободным, а связанным в молекуле, то «облака» p-электронов принимают вид, показанный на рисунке 2.14.





Итак, на смену «волнам материи» пришли «волны вероятности». Вероятностная трактовка волновой функции отражает присущие микрообъектам элементы случайного в их поведении. Необходимой оказывается лишь *вероятность* поведения микрообъекта. Это означает, что предсказания в квантовой физике имеют, вообще говоря *вероятностный* характер и, следовательно, *физика микрообъектов является принципиально статистической теорией*. Случаен факт обнаружения электрона в том или ином месте около ядра; ве-

роятность же его обнаружения в данном месте вполне определённа — она описывается выражением типа (12), т. е., иными словами, определяется формой и размерами соответствующего «электронного облака».

Вероятность лежит в самой основе квантовой механики и вообще квантовой физики. Это неоднократно подчёркивали многие выдающиеся физики. Академик В. А. Фок писал: «В квантовой механике понятие вероятности есть понятие первичное, оно играет там фундаментальную роль» [136, с. 166]. «Статистические методы в физике, — писал Борн, — по мере развития науки распространялись всё больше и больше, и сегодня можно сказать, что современная физика полностью опирается на статистическую основу... Сегодня квантовая теория привела нас к более глубокому пониманию: она установила более тесную связь между статистикой и основами физики. Это является событием в истории человеческого мышления, значение которого выходит за пределы самой науки» [13, с. 23].

Соотношения неопределённостей. Случайность в поведении микрообъекта предопределяет специфику использования в применении к нему таких классических понятий, как, скажем, энергия или импульс. Эта специфика проявляется в знаменитых *соотношениях неопределённостей*, предложенных Гейзенбергом в 1927 г. Ограничимся соотношениями неопределённостей для энергии — времени

$$\Delta E\, \Delta t \gtrsim h/2\pi \qquad (13)$$

и для импульса — координаты

$$\Delta p_x\, \Delta x \gtrsim h/2\pi; \qquad \Delta p_y\, \Delta y \gtrsim h/2\pi; \qquad \Delta p_z\, \Delta z \gtrsim h/2\pi. \qquad (14)$$

В соотношении $\Delta p_x\, \Delta x \gtrsim h/2\pi$ величина Δx есть неопределённость x-координаты микрообъекта, а Δp_x — неопределённость x-проекции его импульса. Чем меньше Δx, тем больше Δp_x и наоборот. Если, в частности, микрообъект находится в состоянии с определённым значением p_x, то он должен быть делокализован по всей оси x. Аналогичный смысл имеют другие соотношения в (14). Соотношение (13) можно трактовать так. Если Δt — время жизни микрообъекта в некотором состоянии (понимаемое, разумеется, в статистическом смысле), то энергия микрообъекта в данном состоянии имеет неопределённость ΔE, которая связана с Δt рассматриваемым соотношением. В частности, если состояние стационарное (Δt сколь угодно велико), то энергия определена точно ($\Delta E = 0$).

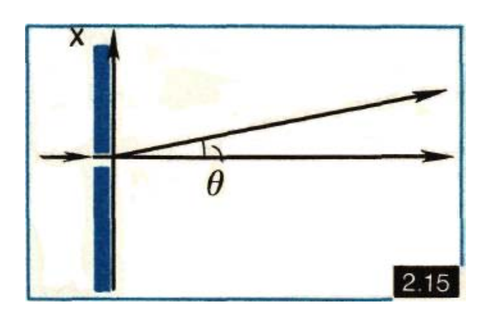
Гейзенберг писал: «Мы не можем интерпретировать процессы в атомарной области так же, как процессы большого масштаба. Если же мы продолжаем пользоваться привычными понятиями, то их применимость надо ограничивать соотношениями неопределённостей» [31, с. 168]. Так, оказывается, не всякие две величины могут одновременно иметь определённые значения. О них говорят, что они не являются одновременно измеримыми величинами. Примером могут служить x и p_x. Поэтому характеристики микрообъекта разбивают на так называемые *полные наборы*, каждый из которых включает одновременно измеримые величины. Примеры таких наборов: (x, y, z) и (p_x, p_y, p_z) или, скажем, (n, l, m) и (r, θ, φ). Обратим внимание на то, что волновая функция, фигурировавшая в (12), является параметрической функцией и что в качестве параметра здесь выступает один полный набор величин, а в качестве аргументов — другой полный набор. Теперь мы можем уточнить смысл волновой функции. *Квадрат её модуля есть вероятность (плотность вероятности) обнаружить микрообъект в некотором состоянии, отвечающем одному полному набору, если известно, что микрообъект находится в определённом состоянии, отвечающем другому полному набору.* Так, $|\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi)|^2$ есть плотность вероятности обнаружить электрон в состоянии с координатами r, θ, φ, если известно, что он находится в состоянии с квантовыми числами n, l, m.

Соотношения неопределённостей не разрешают прямого переноса в квантовую физи-

ку многих классических соотношений. В качестве примера укажем хорошо известные соотношения из классически механики:

$$E = p^2 / 2m + U(\vec{r}); \qquad \vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} \tag{15}$$

($\vec{L}$ — момент импульса). Так как в квантовой физике импульс и координата не являются одновременно измеримыми величинам (они входят в разные полные наборы), то соотношения (15) для микрообъекта не годятся (заметим, что вместо них надо использовать аналогичные соотношения для *операторов* энергии, импульса, момента импульса, координаты; впрочем, это уже особый разговор, он выходит за рамки данной книги).



Ввиду особой важности соотношений неопределённостей считаем полезным показать, как они могут быть получены (хотя бы соотношения для импульса и координаты). Пусть на пути параллельного пучка электронов с импульсом p поставлен экран с узкой щелью, ширина которой в направлении оси x (направлении, перпендикулярном пучку) равна d (рис. 2.15). При прохождении электрона через щель наблюдается дифракция. Обозначим через θ угол между исходным направлением пучка и направлением на первый (основной) дифракционный максимум. Классическая волновая теория даёт следующее выражение для этого угла: $\sin\theta = \lambda / d$. Так как θ очень мал, то упомянутое выражение можно переписать в виде:

$$\theta \approx \lambda / d. \tag{16}$$

Если под λ понимать теперь не длину классической волны, а волновую характеристику электрона, то можно, воспользовавшись выражением (11), переписать (16) на «корпускулярном языке»:

$$\theta \approx h / (pd). \tag{17}$$

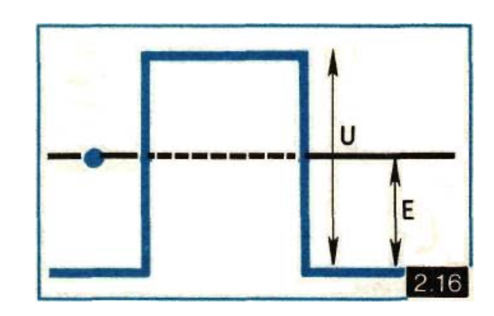
Но как понимать на этом языке сам факт существования угла θ? Он означает, что при прохождении через щель электрон приобретает импульс Δp_x в направлении оси x. Ясно, что $\Delta p_x \approx p\theta$. Подставляя сюда (17), получаем $\Delta p_x \approx h / d$. Рассматривая d как неопределённость Δx x-координаты электрона, проходящего через щель, находим отсюда $\Delta p_x\, \Delta x \approx h$, что и соответствует соотношению неопределённостей. Таким образом, попытка в какой-то мере зафиксировать координату электрона в направлении, перпендикулярном его движению, приводит к возникновению неопределённости импульса в этом направлении. Попутно мы убедились, что соотношения неопределённостей органически связаны с идеей корпускулярно-волнового дуализма.

Некоторые следствия из соотношений неопределённостей. Постулируя стационарные состояния, теория Бора не объяснила, почему всё-таки электрон не излучает и не падает в итоге на ядро. Соотношения (14) это объясняют. Падение на ядро означало бы сильное уменьшение неопределённости координаты электрона. Если до падения на ядро электрон локализован в пределах атома, т. е. области пространства диаметром порядка 10^{-10} *м*, то после падения он должен был бы локализоваться в области диаметром менее 10^{-14} *м*. Согласно (14) более сильная локализация электрона в пространстве связана с

«размытием» его импульса; значит, при падении на ядро среднее значение импульса электрона должно было бы возрасти, для чего потребовалась бы энергия. Получается, что нужны усилия отнюдь не для того, чтобы «удержать» электрон от падения на ядро, а совсем наоборот — нужны усилия, чтобы «заставить» электрон локализоваться в пределах ядра. Нетрудно оценить энергию, необходимую для этого. Достаточно учесть, что она пропорциональна квадрату неопределённости импульса электрона, а значит (с учётом соотношений неопределённостей) обратно пропорциональна квадрату диаметра области локализации. Диаметр ядра в 10^4 раз меньше диаметра атома; следовательно, энергия электрона в ядре должна быть в 10^8 раз больше, чем в атоме т. е. должна была бы равняться 10^9 эВ (напомним, что энергия электрона в атоме порядка 10 эВ). Таким образом, энергия электрона в ядре должна была бы в 100 раз превышать энергию связи нуклонов (последняя не превышает 10^7 эВ). Значит, даже насильно нельзя «заставить» электрон локализоваться внутри атомного ядра. Тем самым не только снимается проблема «падения электрона на ядро», но и выясняется важное обстоятельство: *в состав атомного ядра электроны входить не могут.*

Далее обсудим вопрос о траектории электрона. Из (14) непосредственно следует, что понятие траектории к электрону (как и к иному микрообъекту), строго говоря, *неприменимо,* поскольку траектория требует, чтобы в каждый момент времени были определены и координата, и импульс движущегося объекта. Отказ от траектории связан с наличием у электрона волновых свойств, которые не позволяют рассматривать электрон как *классическую корпускулу*. С перемещением электрона вдоль оси x нельзя сопоставить дифференцируемую функцию $x(t)$, столь широко используемую при рассмотрении движения классических объектов; по известному значению x в некоторый момент t нельзя предсказать значение координаты электрона в момент $t+dt$. Итак, отсутствие в атоме электронных орбит есть прямое следствие соотношений неопределённостей для координаты и импульса электрона.

Существуют, однако, ситуации, когда понятием «траектория микрообъекта» пользоваться всё же допустимо. Примером могут служить траектории частиц, наблюдаемые в камере Вильсона, пузырьковой камере, фотоэмульсии. Ещё один пример — движение электронов в кинескопе телевизора. Рассмотрим этот пример подробнее. Импульс электрона вдоль оси трубки есть $p=\sqrt{2mV}$, где V — ускоряющее напряжение. Формирование электронного пучка означает известную локализацию координаты электронов в поперечном направлении; степень локализации определяется диаметром пучка d. Согласно (14) должна существовать неопределённость импульса электрона в направлении, перпендикулярном к оси пучка $\Delta p \approx h/d$. В силу этой неопределённости электрон может отклониться от оси пучка в пределах угла $\Delta\theta \approx \Delta p/p \approx h/(pd)$. Пусть L — длина пути электрона в кинескопе; тогда неопределённость положения точки попадания электрона на экран будет составлять $\Delta x \approx L\Delta\theta \approx Lh/(pd)$. Полагая $V=20\ кВ$, $d=10^{-5}\ м$, $L=0,2\ м$, находим отсюда $\Delta x \approx 10^{-7}\ м$. Таким образом, обусловленное соотношениями неопределённостей «размытие» точки попадания оказывается существенно меньше диаметра пучка. Ясно, что в таких условий: движение электрона можно рассматривать классически.



В заключение рассмотрим одно из следствий соотношения (13). Предположим, что

имеется *потенциальный барьер*, высота которого U больше энергии E микрообъекта (рис. 2.16). Поставим вопрос: может ли микрообъект, находясь где-то слева от барьера, оказаться через некоторое время справа от него при условии, что не получает энергии извне? Для классической корпускулы это заведомо невозможно. Но перед нами микрообъект, для него справедливы соотношения неопределённостей. Нетрудно убедиться, что соотношение (13) позволяет микрообъекту «пройти под барьером». До встречи с барьером микрообъект свободно двигался сколь угодно долго, поэтому его энергия имела определённое значение. Но вот микрообъект вступает во взаимодействие с барьером. Допустим, взаимодействие длится время Δt. Согласно (13) энергия микрообъекта, взаимодействующего с барьером, уже не будет определённой, а будет характеризоваться неопределённостью $\Delta E \gtrsim h/(2\pi\,\Delta t)$. Если эта неопределённость порядка высоты самого барьера, то последний перестаёт быть для микрообъекта непреодолимым препятствием — микрообъект с некоторой вероятностью проходит сквозь барьер. Этот специфически квантовофизический эффект называют *туннельным эффектом*. Он объясняет, в частности, явление α-распада атомных ядер. Подчеркнём, что при рассмотрении туннельного эффекта нельзя представлять движение микрообъекта по пунктирной линии, изображённой на рисунке. Пунктирная линия соответствует классической траектории, а у микрообъекта таковой нет. Так что не имеет смысла пытаться «уличить» микрообъект в том, что он в какой-то момент времени «оказался под потенциальным барьером».

Диалог. Что такое микрообъект?



Автор. Наверное, нелегко сосчитать, сколько раз в учебнике физики используется слово «электрон». А что такое электрон? Каким его представляют себе школьники? Неужели электроны для них — это просто мелкие крупинки, которые несут в себе отрицательный заряд? Вообще — *что такое микрообъект*? Чем он отличается от тех объектов, с какими имеет дело классическая механика?

Учитель. Эти вопросы в школьном курсе физики практически не поднимаются.

Автор. А между тем вопросы эти весьма принципиальны. Давайте подумаем над ними вместе.

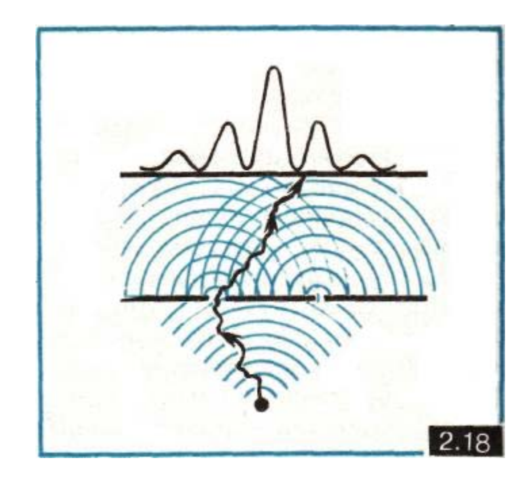
Учитель. Очевидно, что электрон (или иной микрообъект) не есть классическая корпускула. Это не крупинка. Недаром у него, строго говоря, нет траектории. Если бы он был похож на классическую корпускулу, то он двигался бы вокруг ядра по орбите — до тех пор, пока бы не упал на ядро. Для него был бы невозможен туннельный эффект.

Автор. Совершенно верно. Для крупинки не писаны соотношения неопределённостей. А как быть с образом волны?

Учитель. Думаю, что электрон нельзя уподоблять и классической волне. По-видимому, он представляет собой некий симбиоз корпускулы и волны.

Автор. В своё время предпринимались различные попытки смоделировать подобный симбиоз и тем самым *наглядно* представить корпускулярно-волновой дуализм. Одна из таких попыток связана с представлением микрообъекта в виде волнового образования конечных размеров. Это может быть *волновой пакет* или просто «обрывок» волны, называемый обычно *волновым цугом* (рис. 2.17). Другая попытка связана с использованием модели *шины-пилота*, согласно которой микрообъект есть некое «соединение» корпускулярной «сердцевины» с волной, управляющей движением «сердцевины». Волна представляет собой колебания некоторого нового поля (ψ-поля), похожего на электромагнитное. Взаимодействие «сердцевины» с ψ-полем приводит к тому, что «сердцевина» проявляет тенденцию находиться в тех областях пространства, где напряжённость ψ-поля наибольшая. Этому мешают неупорядоченные движения «сердцевины», которые могут быть обусловлены, например, флуктуациями ψ-поля. Флуктуации предопределяют неупорядоченные блуждания микрообъекта, а взаимодействие «сердцевины» с ψ-полем заставляет микрообъект устремляться туда, где ψ-поле наиболее интенсивно. Рисунок 2.18 иллюстрирует данную модель в применении к прохождению микрообъекта через экран со щелями: ψ-волна испытывает дифракцию на щелях, а «сердцевина» проходит через одну из щелей и регистрируется на экране-детекторе в соответствии с результатом интерференции ψ-волн.


2.17


2.18

Учитель. Признаться, модель волны-пилота меня привлекает.

Автор. Действительно, подобные модели могут с первого взгляда показаться привлекательными — хотя бы в силу своей наглядности. Однако сразу же подчеркнём: *все они несостоятельны*. Обратите внимание на громоздкость приглянувшейся Вам модели волны-пилота, использующей такие искусственные понятия, как «ψ-поле» с его флуктуациями, как «сердцевина», каким-то образом взаимодействующая с ψ-полем. Впоследствии мы убедимся, что несостоятельность подобных моделей объясняется не частными, а глубокими, принципиальными причинами. Следует заранее признать безуспешной всякую попытку *буквального толкования* корпускулярно-волнового дуализма. *Микрообъект не является ни корпускулой, ни волной, ни симбиозом корпускулы и волны.*

Учитель. Как же понимать корпускулярно-волновой дуализм?

Автор. Как *потенциальную способность* микрообъекта проявлять различные свои свойства в зависимости от внешних условий и, в частности, от условий наблюдения. Как писал В. А. Фок, «у атомных объектов в одних условиях выступают на передний план волновые свойства, а в других — корпускулярные; возможны и такие условия, когда те и другие свойства выступают одновременно. Можно сказать, что для атомного объекта существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от внешних условий, либо как частица, либо как волна, либо промежуточным образом. Именно в этой потенциальной возможности различных проявлений свойств, присущих микрообъекту, и состоит дуализм волна — частица. Всякое иное, более буквальное, понимание этого дуализма в виде какой-нибудь модели неправильно» [136, с. 163]. Пример: электроны проходят через щели в экране и затем регистрируются на экране-детекторе. При прохождении сквозь щели электроны проявляют свои волновые свойства, а при попадании на экран-детектор — корпускулярные.

Учитель. Получается, что наглядная модель микрообъекта вообще невозможна?

Автор. Вы задали очень важный вопрос. Действительно, буквальная, наглядная модель микрообъекта оказывается невозможной. Такова специфика микрообъектов, этим они принципиально отличаются от тех объектов, с которыми мы обычно имеем дело.

Учитель. Тем не менее хотелось бы иметь хотя бы какую-то упрощённую модель микрообъекта. Можно ли говорить об объекте, не представляя себе его образа?

Автор. Мы только что пытались смоделировать корпускулярно-волновой дуализм. А ведь дуализм не исчерпывает необычных свойств микрообъекта, в частности электрона. У него есть, например, спин — нечто, напоминающее собственный момент импульса. Как если бы электрон, подобно волчку, вращался вокруг собственной «оси». Однако это «вращение» весьма необычно — оно неуничтожимо, его нельзя ни остановить, ни ускорить; вообще не имеет смысла говорить о его угловой скорости. Используемый в аппарате квантовой механики вектор спинового момента импульса электрона (вектор спина) может иметь всего два направления. Эти направления противоположны, им отвечают два «спиновых состояния» электрона.

Учитель. Почему бы не считать условно, что «сердцевина» в модели волны-пилота подобна вращающемуся волчку?

Автор. Вращение «сердцевины» имеет не больше смысла, чем вращение материальной точки. Но продолжим разговор о необычных свойствах микрообъектов. Оказалось, что со спином тесно связан характер поведения микрообъектов в коллективе себе подобных. Все микрообъекты можно чётко разбить на две группы. Микрообъекты одной группы обнаруживают своеобразную «нетерпимость» друг к другу: в одном состоянии может находиться один и только один микрообъект данного типа. Например, в одном состоянии может находиться один и только один электрон; никакой другой электрон не сможет попасть в это состояние.

Учитель. Это свойство электронов обычно формулируется как *принцип запрета Паули*.

Автор. Принцип запрета, сформулированный в 1925 г. В. Паули (1900 – 1958) применительно к электронам, справедлив для всех микрообъектов рассматриваемой группы. В неё входят микрообъекты, спин которых оказывается полуцелым (заметим, что спин измеряется в единицах $h/2\pi$); у электрона, протона, нейтрона, например, спин равен 1/2. Все эти микрообъекты объединяют общим термином «фермионы» (в честь Э. Ферми (1901 – 1954)).

Но есть другая группа микрообъектов — эти, напротив, обнаруживают друг по отношению к другу исключительное «чувство коллективизма»: они могут заселять одно и то же состояние в неограниченном количестве и притом с тем большей вероятностью, чем сильнее это состояние заселено. В данную группу входят микрообъекты без спина или с целочисленным спином; к ним относятся, в частности, фотоны (спин фотона равен 1). Все эти микрообъекты объединяют термином «бозоны» (в честь Ш. Бозе (1894 – 1974)).

Отмеченное свойство микрообъектов в высшей степени важно. Именно благодаря своей «фермионности» электроны заполняют уровни в атомах (электронные оболочки) в определённой последовательности — ведь максимальное число электронов на том или ином уровне равно числу состояний, соответствующих данному уровню. Если бы вдруг электроны утратили «фермионность», т. е. перестали бы подчиняться принципу запрета Паули, то во всех атомах они тут же свалились бы на самый нижний уровень — и исчезло бы многообразие химических элементов. Заметим также, что именно благодаря «бозонности» фотонов происходит индуцированное испускание излучения: фотон инициирует переход в атоме, в результате которого рождается ещё один фотон в том же самом состоянии. А теперь подумаем: возможно ли данное свойство микрообъектов выразить в какой-либо наглядной модели? Как вообще согласовать необычность свойств микрообъектов с привычными наглядными образами? Совместимо ли одно с другим?

Учитель. Наверное, не совместимо. И всё же почему бы не допустить хотя бы в принципе возможность каких-то достаточно сложных моделей, насыщенных необходимыми деталями?

Автор. Вряд ли такие модели принципиально возможны. Но дело не только в этом. У микрообъектов и микроявлений есть важная особенность, о которой мы пока не говорили. Воспитанные в традициях классической физики, мы убеждены, что любой объект можно хотя бы мысленно расчленить на сколь угодно малые детали, что любое явление можно разбить во времени на сколь угодно короткие последовательные этапы. Одним словом, мы убеждены в беспредельных возможностях метода анализа. Вопрос «что это такое?» мы привыкли сводить к вопросу «из чего это состоит?» Квантовая физика заставила осознать ограниченность такой точки зрения. Характерная особенность микрообъектов и микроявлений состоит в том, что они принципиально не допускают безграничной детализации ни в пространстве, ни во времени. Это весьма глубокое обстоятельство настойчиво подчёркивал Бор. Он писал: «С открытием Планком *элементарного кванта действия* началась новая эпоха в физических науках. Это открытие обнаружило свойственную атомным процессам черту *цельности*, идущую гораздо дальше старой идеи об ограниченной делимости

материи. Стало ясно, что свойственное классическим теориям наглядное картинное описание представляет идеализацию» [12, с. 527]. Вот эта подчёркиваемая Бором «черта цельности» и заставляет нас воздержаться от соблазна поставить вопрос «из чего состоит электрон?»

Кроме того, как мы уже отмечали ранее (в диалоге «О привычке видеть за вероятностями однозначные закономерности»), для микрообъектов характерна принципиально неуничтожимая *связь с окружающим миром*, делающая бессмысленным понятие «изолированный микрообъект». Именно эта связь и обусловливает зависимость некоторых свойств микрообъекта от конкретных внешних условий. Такие свойства мы рассматриваем как потенциальные возможности, реализуемые в зависимости от внешних условий. Очевидно, что эти потенциальные возможности никак нельзя уместить в рамках определённой наглядной модели, сколь бы сложна и изощрённа она ни была.

Учитель. Что ж, нельзя не признать приведённые доводы вескими. Но хотелось бы всё же высказать одно сомнение. Нет ли здесь субъективности? Если всё зависит от внешних условий, в частности от условий наблюдения, то невольно возникает мысль: микрообъект не есть что-то объективное, а скорее нечто субъективное, зависящее от того, как на него «посмотреть».

Автор. Вы упускаете из виду, что электрон имеет целый набор совершенно определённых характеристик, например массу, электрический заряд, спин, относится к фермионам. А вот наглядной модели он не имеет. Однако, отказываясь от неё, квантовая механика вовсе не приносит объективность в жертву субъективности. Просто надо признать, что электрон — весьма сложный физический объект, который *в зависимости от внешних условий* реализует разные стороны своей сущности. Существенно, что эти стороны *объективно* существовали ещё до рождения наблюдателя.

Учитель. И всё же роль *наблюдателя* оказывается здесь в известном смысле решающей.

Автор. В этом Вы совершенно правы. Чтобы, например, измерить импульс электрона, наблюдатель организует эксперимент таким образом, что при этом пространственные координаты электрона становятся неопределёнными. Измеряя координаты, он ставит эксперимент, в котором электрон «превращается» в объект с неопределённым импульсом. Но при чём здесь субъективизм? Соотношения неопределённостей — *объективный закон*. Наблюдатель и его экспериментальные установки — *объективные факторы*. Воздействие условий эксперимента на измеряемый объект — *тоже объективный фактор*. Просто раньше мы всегда мысленно помещали человека где-то вне изучаемого им мира, как бы над этим миром. Такова была философия классической физики. Об этом хорошо сказал Борн: «Предполагается, что внешний мир — объект естествознания, с одной стороны, и мы — наблюдающие, мыслящие и вычисляющие субъекты, с другой, полностью отделены друг от друга, что существует способ исследовать явления, не вмешиваясь в их течение. Такова философия науки, при которой выросли мы, люди старого поколения» [13, с. 25]. Квантовая физика подчеркнула, что человек — часть природы, неразрывно связанная с ней, что, исследуя природу, человек *неизбежно изменяет её*, что, изучая явления, он *неизбежно вмешивается в их течение.*

Учитель. Разрешите высказать ещё одно сомнение. Не рискует ли квантовая физика, отвергая модели, утратить в какой-то мере материальную основу? Не останутся ли в итоге фактически только уравнения и абстрактные математические символы?

Автор. Не будем становиться на точку зрения: либо наглядные модели, либо математические абстракции. Эта точка зрения метафизична. Квантовая физика подходит к подобным вопросам достаточно гибко, диалектично.

Учитель. Не понимаю, что именно Вы хотите сказать.

Автор. В связи с высказанным Вами сомнением мне хочется подчеркнуть две мысли. Первая: хотя наглядной модели микрообъекта не существует, однако это не мешает широко использовать в квантовой физике модельные представления. Имеются в виду условные

модели, условные образы. Квантовая физика широко применяет их — то одни, то другие, признавая *относительность* всех и всяких моделей. Важно лишь одно: чтобы каждая из используемых моделей отражала какую-то сторону сущности микрообъекта. Так, рассматривая переходы электрона с одного уровня на другой, мы, не смущаясь, изображаем его как некую «корпускулу», совершающую «скачки» по энергетической шкале. Хорошим примером условного моделирования служит также образ электронного облака, используемый для электрона в атоме.

Учитель. Получается, что проблемы моделирования не существует. Надо лишь, чтобы все используемые модели понимались не буквально, не абсолютно, а условно, относительно.

Автор. Как Вы понимаете, это очень принципиально.

Учитель. Понимаю, конечно. Но Вы хотели подчеркнуть ещё одну мысль.

Автор. Вторая мысль такова: квантовая физика использует на равноправных началах и условные модели, и математические абстракции. И в этом пункте новая физика резко расходится с классическими представлениями. Подчёркивая большое *эвристическое* значение, какое математика приобретает в квантовой физике и которого она раньше (в эпоху господства наглядных представлений) не имела, академик С. И. Вавилов писал: «Для наглядной, модельной интерпретации картины не хватает привычных образов и понятий, но логика с её необъятной широтой, воплощённая в математические формы, остаётся в силе, устанавливая порядок связи в новом, непонятном мире и открывая возможности физических предсказаний» [64, с. 440].

Учитель. Думаю, здесь выражена очень глубокая мысль. По-видимому, все наши затруднения с интерпретацией микрообъекта связаны с тем, что на уровне микроявлений нам действительно не хватает образов и понятий для формирования наглядных представлений. Ведь мы смотрим в «микромир» из нашего обычного мира, применяем макроскопические приборы. Мы пытаемся применить известные нам из нашей практики образы и понятия там, где должны «работать» совсем иные образы и понятия.

Автор. Полностью с Вами согласен. Именно это, кстати говоря, отмечал Бор. Он писал «Физикам был преподан урок, указывающий на ту осторожность, с какой надо применять все обычные представления всякий раз, как мы имеем дело не с повседневным опытом» [12, с. 280]. «При изучении атомных явлений мы неоднократно научались тому, что вопросы, на которые, как считалось, давно получены окончательные ответы, таят в себе подчас неожиданные для нас сюрпризы» [12, с. 282]. Мы должны помнить об этом и с осторожностью применять обычные представления, обсуждая вопрос о том, что такое есть микрообъект.

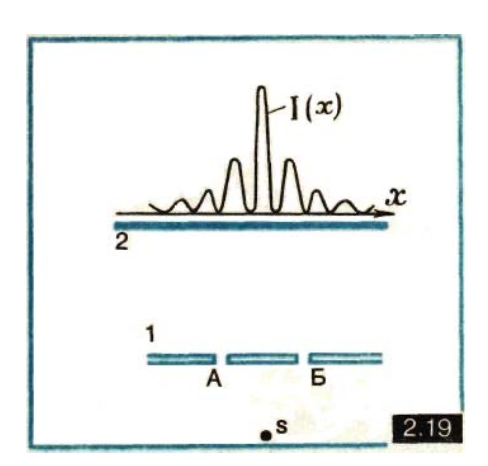
Учитель. Признаюсь, ранее проблема интерпретации микрообъектов не представлялась мне особенно важной. Мы обсуждали с учащимися разные ситуации с участием электронов или фотонов, не задумываясь нал тем, что же из себя представляют эти самые электроны и фотоны. Теперь я вижу, что без обсуждения подобных вопросов, без понимания необычности свойств и поведения микрообъектов, условности применения к ним привычных представлений нельзя ступить даже на порог квантовой физики, а значит, и вообще современной физики. Между прочим, мне стало понятно, что поиски наглядной модели микрообъекта — это фактически попытка втиснуть идеи квантовой физики в рамки классической.

§ 8. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА: НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

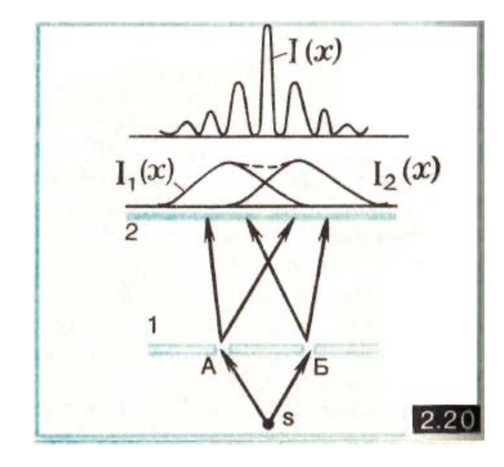
Микрообъект в интерферометре. Напомним известный опыт по *интерференции света*. На рисунке 2.19 дана схема простейшего интерферометра: S — источник монохроматического света, *1* — экран со щелями *А* и *Б*, *2* — экран-детектор, на котором регистрируется распределение интенсивности света. Оно описывается кривой $I(x)$ имеющей интерференционный вид, что хорошо объясняет волновая теория света. Как известно, объяснение интерференции света на основе волновых представлений было дано ещё в начале XIX в. Т. Юнгом. С тех пор опыт, изображённый на рисунке 2.19, называют *опытом Юнга*.

Казалось бы, какое отношение имеет к квантовой физике давно открытое и объяснённое явление интерференции света? Оказывается, самое прямое.

Будем постепенно уменьшать интенсивность света от источника. Освещённость экрана-детектора будет, естественно, уменьшаться. Но интерференционный вид кривой $I(x)$ сохранится. Увеличивая время экспозиции, можно получить на экране-фотопластинке интерференционную кривую $I(x)$ при сколь угодно малой интенсивности светового пучка — даже тогда, когда через интерферометр проходят уже не световые волны, а фактически отдельные фотоны. Как показывает опыт, распределение попаданий фотонов даёт на фотодетекторе ту же самую интерференционную картину.



2.19



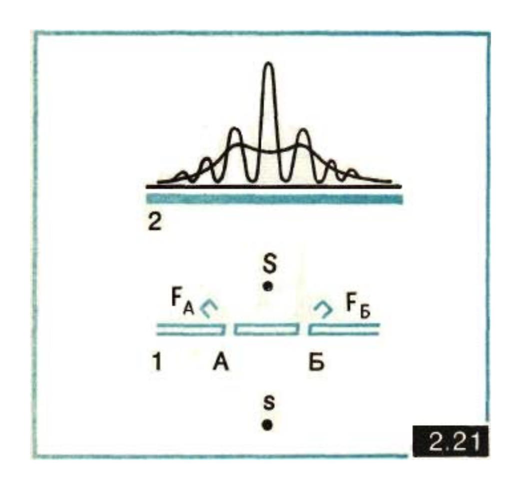
2.20

Интерференция наблюдается и тогда, когда в S (рис. 2.19) находится источник моноэнергетических электронов. При этом можно опять-таки сколь угодно уменьшать интенсивность пучка. Можно даже поставить опыт, когда электроны проходят через интерферометр сугубо поодиночке; такой опыт поставил в 1949 г. В. А. Фабрикант (р. 1907). И в этом случае на экране-детекторе возникала интерференционная кривая (разумеется, при достаточно большом времени экспозиции). Опыты с другими микрообъектами дали аналогичные результаты. Таким образом, интерференция наблюдается для всех микрообъектов — фотонов, электронов, нейтронов и т. д. Более того, опыт показывает, что она должна объясняться не свойствами коллективов микрообъектов, а свойствами *отдельного* микрообъекта.

Как же ведёт себя в интерферометре микрообъект? Пусть это будет электрон. Закроем щель *Б*; в этом случае на экране возникает распределение, описываемое кривой $I_1(x)$ (рис. 2.20). Откроем щель *Б*, но закроем *А*; возникнет распределение $I_2(x)$. При обеих открытых щелях возникает не суммарное распределение $I_1(x)+I_2(x)$, а интерференционное $I(x)$. Если считать, что каждый электрон проходит через какую-то одну щель, то появле-

ние интерференционного распределения $I(x)$ наводит на мысль, что электрон неким образом «ощущает» при этом другую щель. Ведь в противном случае каждому электрону, проходящему через ту или иную щель, безразлично, открыта или закрыта соседняя щель, и тогда распределение попаданий при обеих открытых щелях должно было бы описываться суммарной кривой $I_1(x)+I_2(x)$.

Каким же образом электрон, проходя через одну щель, «ощущает» при этом другую? Здесь пригодилась бы модель волны-пилота, если бы только ею можно было пользоваться. А может быть электрон как-то проходит сразу через две щели? Остаётся одни обратиться снова к опыту и попробовать *подглядеть*, как именно проходит электрон через экран со щелями.



Поместим вблизи щелей *А* и *Б* экрана *1* источник света *S* и фотоприёмники $F_А$ и $F_Б$ (рис. 2.21). Источник света и фотоприёмники предназначены для подглядывания за прохождением электронов через экран со щелями (фотоприёмники регистрируют свет, рассеянный электроном вблизи соответствующей щели). Если электрон проходит сразу через обе щели, то должны срабатывать одновременно оба фотоприёмника. Если же электрон проходит через одну из щелей, то сработает лишь соответствующий фотоприёмник.

Итак, включим источник света и понаблюдаем за фотоприёмниками. При этом позаботимся, чтобы электроны проходили через экран со щелями поодиночке: источник электронов должен испускать очередной электрон уже после того, как предыдущий достиг экрана-детектора. Опыт показывает, что всякий раз срабатывает только один фотоприёмник — либо левый, либо правый — и никогда не срабатывают оба фотоприёмника одновременно. Значит, электрон проходит не через обе щели, а только через одну. При этом всякий раз можно указать, через какую именно щель прошёл тот или иной электрон.

Но не будем торопиться с выводами и доведём опыт до конца — получим достаточно большое число попаданий электронов на экране-детекторе и посмотрим, как распределятся эти попадания. Во тут-то нас и ожидает сюрприз! На экране обнаруживается не интерференционная кривая $I(x)$, а суммарная кривая $I_3(x)=I_1(x)+I_2(x)$. Повторим опыт, выключив источник света (и тем самым прекратив подглядывание за прохождением электронов через щели) В этом случае опять возникает интерференционная кривая $I(x)$.

Получается, что при выключенном источнике света интерференция есть, а при включенном её нет. *Как только начинается контролирование процесса прохождения электронов через экран со щелями, интерференция исчезает.* Можно сказать, что наблюдение за поведением электрона в интерферометре *разрушает интерференцию*.

Иначе говоря, если опыт ставится таким образом, чтобы всякий раз было ясно, через какую именно щель проходит электрон, интерференции нет. Однако интерференция возникает, если опыт ставится так, что неизвестно, где именно прошёл электрон.

Вероятность и амплитуда вероятности перехода. Используя вероятностные представления, нетрудно объяснить результаты рассмотренных экспериментов. Но предвари-

тельно нужно ввести некоторые понятия.

Предположим в общем случае, что рассматривается переход микрообъекта из некоторого начального *s*-состояния в одно из конечных состояний (в *n*-состояние). Пока несущественно, какие это состояния. Потребуем лишь, чтобы конечные состояния образовывали не непрерывный, а дискретный набор — в противном случае пришлось бы рассматривать не вероятность перехода $s \to n$, а плотность вероятности. Итак, введём *вероятность перехода* из *s* в *n*: w_n. Строго говоря, надо было бы записывать эту вероятность как $w_{s\to n}$. Но мы для простоты будем писать w_n.

Введём *амплитуду вероятности перехода* (сокращённо: *амплитуда вероятности* или ещё проще — *амплитуда*). Это есть величина ψ_n — такая, что квадрат её модуля равен вероятности перехода:

$$w_n = |\psi_n|^2 . \qquad (1)$$

Вообще-то амплитуду надо было бы записывать с указанием начального состояния; например, так: $\psi_{s\to n}$. В квантовой физике используется в данном случае специальное обозначение: $< n \,|\, s >$ (его надо читать справа налево — от *s* к *n*). Такие обозначения очень удобны, но, к сожалению, они для наших читателей непривычны, могут отпугнуть. Думаем, что выигрыш в удобстве от их использования был бы в данной книге меньше проигрыша, обусловленного их непривычностью. Поэтому будем писать упрощённо: ψ_n.

Учитель. Но позвольте, введённые Вами амплитуды ψ_n очень похожи на волновую функцию! Ведь квадрат модуля волновой функции тоже есть вероятность.

Автор. Вы совершенно правы. *Амплитуда и волновая функция — это одно и то же*. Позднее я это покажу.

Учитель. Но, может быть, с самого начала следовало использовать знакомый термин «волновая функция»?

Автор. С самого начала мне этого делать не хотелось бы. Во-первых, мы рассматриваем *вероятность перехода*, поэтому естественно говорить об *амплитуде* этой вероятности. Ни о каких волнах, собственно говоря, речь здесь не идёт. Во-вторых, если Вы помните, волновая функция описывает *состояние* микрообъекта; здесь же рассматривается переход микрообъекта из одного состояния в другое.

Учитель. Вот это очень существенно!

Автор. Как раз тут Вы ошибаетесь. Вспомните: квадрат модуля волновой функции определяет вероятность обнаружить микрообъект в соответствующем состоянии. Нетрудно показать, что это утверждение можно перевести на язык вероятностей переходов. И мы это покажем, но только позднее. А пока забудем на время о волновой функции — будем говорить о вероятностях и амплитудах переходов.

Предположим, что есть несколько вариантов перехода из *s* в *n* (несколько альтернатив), им отвечают амплитуды ψ_{ni}, где *i* обозначает вариант перехода. Возможны два принципиально различных случая.

Первый случай: альтернативы *различимы* — известно, каков именно из вариантов перехода реализуется всякий раз. В данном случае результирующая вероятность перехода $s \to n$ есть сумма вероятностей переходов, отвечающих разным альтернативам:

$$w_n = |\psi_{n1}|^2 + |\psi_{n2}|^2 + \ldots = \sum_i |\psi_{ni}|^2. \qquad (2)$$

Мы имеем здесь дело с известной *теоремой сложения вероятностей*.

Второй случай: альтернативы *неразличимы* — неизвестен реализуемый всякий раз ва-

риант перехода. Существенно, что в данном случае надо складывать не *вероятности* вариантов перехода, а их *амплитуды:*

$$\psi_n = \psi_{n1} + \psi_{n2} + \ldots = \sum_i \psi_{ni}. \qquad (3)$$

Поэтому выражение для вероятности перехода $s \to n$ имеет вид

$$w_n = |\psi_n|^2 = |\psi_{n1} + \psi_{n2} + \ldots|^2 = |\sum_i \psi_{ni}|^2. \qquad (4)$$

Случай неразличимых альтернатив специфичен для квантовой физики. В классической физике он принципиально невозможен — там всегда можно, в принципе, проследить за любым перемещением объекта. Иное дело микрообъект, скажем, электрон — он не имеет траектории, он тождествен с любым другим электроном (два электрона похожи друг на друга значительно больше, чем вошедшие в поговорку две капли воды; замену одного электрона другим принципиально нельзя обнаружить), кроме того, электрон может совершать мгновенные квантовые скачки между уровнями энергии. В этих условиях существование действительно неразличимых альтернатив того или иного перехода оказывается возможным.

Сопоставим $|\sum_i \psi_{ni}|^2$ с $\sum_i |\psi_{ni}|^2$. Легко видеть, что вероятность $|\sum_i \psi_{ni}|^2$ содержит в себе сумму $\sum_i |\psi_{ni}|^2$ плюс набор слагаемых перекрёстного (интерференционного) типа: $\psi_{n1}\psi^*_{n2} + \psi^*_{n1}\psi_{n2} + \psi_{n1}\psi^*_{n3} + \psi^*_{n1}\psi_{n3} + \ldots$ (знак * означает комплексное сопряжение). В связи с этим говорят, что в случае, когда альтернативы неразличимы, происходит *интерференция амплитуд*, отвечающих разным альтернативам. Фактически под интерференцией амплитуд надо понимать *сложение амплитуд*. Интерференция амплитуд записывается в виде (3).

А теперь обратимся к рассматривавшимся выше экспериментам с электронами в двухщелевом интерферометре.

Электрон в интерферометре: интерференция амплитуд. Обсудим эксперимент, изображённый на рисунке 2.20. Чтобы иметь дело с вероятностью перехода (а не с плотностью вероятности), разобьём экран-детектор по оси x на множество одинаковых маленьких отрезков, последовательно пронумеруем их: $1, 2, 3, \ldots, n, \ldots$ — и будем рассматривать вероятность w_n того, что электрон, испущенный источником s, будет зарегистрирован в пределах n-го отрезка (это есть вероятность перехода $s \to n$). Распределение попаданий электронов на экране-детекторе будет иметь в данном случае вид ступенчатой линии, но это не беда — ступенчатую линию можно сгладить, аппроксимировать её плавной кривой.

Предположим, что обе щели — *А* и *Б* — открыты и не принимаются какие-либо меры для выяснения, через какую именно щель проходит всякий раз электрон. В этом случае имеем две неразличимые альтернативы, отвечающие прохождению электрона через щель *А* или щель *Б*. Соответствующие указанным альтернативам амплитуды вероятности перехода $s \to n$ обозначим через $\psi_{nА}$ и $\psi_{nБ}$. Неразличимость альтернатив приводит к интерференции амплитуд:

$$\psi_n = \psi_{nА} + \psi_{nБ}. \qquad (5)$$

и, таким образом, результирующая вероятность w_n имеет вид (в соответствии с (4)):

$$w_n = |\psi_{nА} + \psi_{nБ}|^2 . \qquad (6)$$

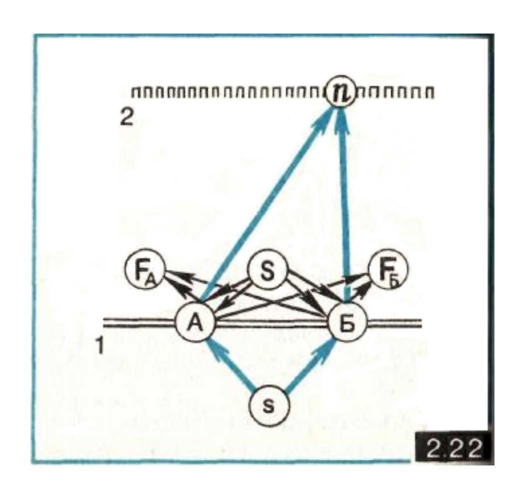
Далее учтём, что

$$|a+b|^2=(a+b)(a^*+b^*)=|a|^2+|b|^2+(ab^*+ba^*).$$

Итак,

$$w_n=|\psi_{nA}|^2+|\psi_{nБ}|^2+[\psi_{nA}\psi_{nБ}{}^*+\psi_{nБ}\psi_{nA}{}^*]. \quad (7)$$

Заключенное в квадратные скобки в (7) выражение как раз и определяет интерференционный вид кривой $I(x)$, наблюдаемой на экране *2* при обеих открытых щелях. Таким образом, интерференционное распределение попаданий электронов на экране-детекторе есть следствие *интерференции амплитуд* для двух возможных вариантов перехода электрона из начального состояния в конечное.



Электрон в интерферометре: разрушение интерференции в измерительном акте. Теперь попробуем проконтролировать прохождения электронов через щели *А* и *Б* с помощью источника света *S* и фотоприёмников F_A и $F_Б$ (рис. 2.22). Рассмотрим проблему шире — будем вначале полагать, что фотоны, рассеянные на электронах вблизи любой из щелей, могут быть зарегистрированы как одним, так и другим фотоприёмником, иначе говоря, будем полагать, что рассеянный фотон может попасть как в свой (соответствующий данной щели), так и чужой фотоприёмник. Так может быть при использовании света с достаточно большой длиной волны. В этом случае фотоны, очевидно, не контролируют прохождение электронов через экран с щелями. Наряду с уже знакомыми амплитудами ψ_{nA} и $\psi_{nБ}$ будем использовать ещё две амплитуды: φ_1 — амплитуду вероятности фотону рассеяться в свой фотоприёмник (это есть амплитуда фотонных переходов $S\to A\to F_A$ и $S\to Б\to F_Б$; для обоих переходов амплитуда одна и та же ввиду симметрии схемы эксперимента, хорошо видной на рисунке) и φ_2 — амплитуду вероятности фотону рассеяться в чужой фотоприёмник (амплитуда фотонных переходов $S\to A\to F_Б$ и $S\to Б\to F_A$).

Пусть электрон совершает переход $s\to n$ и одновременно фотон, рассеивающийся на этом электроне, совершает переход $S\to F_A$. Как записать амплитуду Ψ такого парного перехода? Возможны две альтернативы: 1) электрон проходит через щель *А* (амплитуда ψ_{nA}), а фотон рассеивается в свой фотоприёмник (амплитуда φ_1); для этой альтернативы: $\Psi_A=\psi_{nA}\varphi_1$ 2) электрон проходит через щель Б (амплитуда $\psi_{nБ}$), а фотон рассеивается в чужой фотоприёмник (амплитуда φ_2); для этой альтернативы: $\Psi_Б=\psi_{nБ}\varphi_2$. Так как указанные альтернативы неразличимы, то

$$\Psi=\Psi_A+\Psi_Б=\psi_{nA}\varphi_1+\psi_{nБ}\varphi_2. \quad (8)$$

Пусть теперь электрон совершает переход $s\to n$ и одновременно фотон совершает переход $S\to F_Б$. Обозначим через Φ амплитуду такого парного перехода. В этом случае

также возможны две альтернативы: 1) электрон проходит через щель *А* (ψ_{nA}), а фотон рассеивается в чужой фотоприёмник (φ_2): $\Phi_A = \psi_{nA}\varphi_2$; 2) электрон проходит через щель *Б* ($\psi_{nБ}$), а фотон рассеивается в свой фотоприёмник (φ_1): $\Phi_Б = \psi_{nБ}\varphi_1$. Альтернативы неразличимы, поэтому

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_Б = \psi_{nA}\varphi_2 + \psi_{nБ}\varphi_1 \qquad (9)$$

Для результирующей вероятности w_n электронного перехода $s \to n$ безразлично, где будет зарегистрирован рассеянный электроном фотон — в фотоприёмнике F_A или $F_Б$. Поскольку оба варианта (попадание фотона в F_A или в $F_Б$), очевидно, различимы, то в соответствии с (4) можем записать:

$$w_n = |\Psi|^2 + |\Phi|^2 \qquad (10)$$

Подставляя сюда (8) и (9), получаем

$$w_n = (|\psi_{nA}|^2 + |\psi_{nБ}|^2)(|\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2) + (\psi_{nA}\psi_{nБ}^* + \psi_{nБ}\psi_{nA}^*)(\varphi_1\varphi_2^* + \varphi_2\varphi_1^*). \qquad (11)$$

Итак, результирующая вероятность w_n складывается из двух слагаемых. Первое представляет собой умноженную на $(|\varphi_1|^2 + |\varphi_2|^2)$ сумму вероятностей переходов через щели *А* и *Б*, рассматриваемых по отдельности. Второе обусловлено интерференцией амплитуд. Благодаря наличию этого второго слагаемого и наблюдается интерференционное распределение попаданий электронов на экране-детекторе. Напомним, что мы предполагали достаточно большую длину волны света, поэтому фотоны не могли контролировать прохождение электронов через щели.

Теперь начнём уменьшать длину волны света. При этом будет уменьшаться вероятность попадания рассеянного электроном фотона в чужой фотоприёмник, т. е. будет уменьшаться амплитуда φ_2. Её уменьшение понизит, как это можно видеть из (11), относительный вклад интерференционного слагаемого. В результате наблюдаемая на экране-детекторе интерференционная картина начнёт смазываться.

При достаточно малой длине волны света возможен точный контроль за прохождением электронов через щели. В этом случае фотон, рассеянный вблизи той или иной щели, попадает только в свой фотоприёмник. Это означает, что $\varphi_2 = 0$. При обращении амплитуды φ_2 в нуль выражение (11) преобразуется к виду:

$$w_n = |\varphi_1|^2 (|\psi_{nA}|^2 + |\psi_{nБ}|^2). \qquad (12)$$

Таким образом, контролирование прохождения электронов через щели, делая альтернативы различимыми, приводит к разрушению интерференции.

Обратим внимание на принципиальное обстоятельство: разрушение интерференции является следствием мер, принимаемых в измерительном акте, который в данном случае решает задачу — выяснить, через какую именно щель проходит тот или иной электрон. Коротко говоря, *измерение (наблюдение) разрушает интерференцию*. Мы убеждаемся, что роль *наблюдателя* в квантовой физике действительно весьма специфична — *наблюдая за явлениями, производя над ними измерения, он тем самым изменяет течение самих явлений*.

Приведённый пример демонстрирует ещё одну тонкость. Оказывается, наряду с *полной неразличимостью* и *полной различимостью* существует непрерывный ряд промежуточных ситуаций, отвечающие *частичной различимости*. Результат (12) описывает предельный случай полной различимости рассматриваемых здесь альтернатив. Противоположный предельный случай полной неразличимости альтернатив предполагает одинаковую вероятность фотону попасть как в свой, так и в чужой фотоприёмник — когда

$\varphi_1 = \varphi_2$. В этом случае выражение (11) преобразуется, как нетрудно убедиться, к виду:

$$w_n = 2\,|\,\varphi_1\,|^2\,|\,\psi_{nA} + \psi_{nБ}\,|^2\,. \tag{13}$$

Общее выражение (11) описывает промежуточные ситуации, отвечающие частичной различимости альтернатив. Ситуации, отличающиеся друг от друга значением интерференционного слагаемого в (11). Чем меньше это слагаемое, тем больше степень различимости альтернатив.

Теперь мы можем уточнить сделанные ранее замечания. *Теорема сложения вероятностей работает, когда альтернативы полностью различимы. Она не работает в случае частичной различимости и тем более полной неразличимости. Во всех этих случаях наблюдается интерференция амплитуд вероятностей.*

Амплитуда вероятности перехода и волновая функция; принцип суперпозиции. Следуя существующей традиции, данный пункт надо было бы снабдить значком * — чтобы предупредить читателя о том, что излагаемый здесь материал достаточно труден и может быть опущен при первом чтении. Не входя в детали математического аппарата квантовой теории, дадим читателю возможность почувствовать, что амплитуда вероятности перехода и волновая функция — это, в сущности, *одно и то же*.

В соответствии с замечаниями, сделанными в предыдущем параграфе, волновая функция является *параметрической функцией* $\psi_\alpha(\beta)$, где роль параметра α играют величины *одного* полного набора, а аргумента β — величины *другого* полной набора (для простоты будем полагать, что все величины изменяются дискретно). Состояния микрообъекта, в которых имеют определённые значения величины α-набора, будем называть α-состояниями, а состояния, где определены величины β-набора, — β-состояниями. Учитывая это, можно определить $|\,\psi_\alpha(\beta)\,|^2$ как вероятность того, что микрообъект, находящийся в некотором α-состоянии, будет иметь (при измерении) те или иные значения величин β-набора. Или можно сказать то же самое немного иначе: $|\,\psi_\alpha(\beta)\,|^2$ есть вероятность того, что микрообъект, находящийся в некотором α-состоянии, может быть обнаружен также в том или ином β-состоянии. Примем во внимание, что акт обнаружения микрообъекта есть некий измерительный акт, после которого микрообъект более не находится в α-состоянии, а находится в одном из β-состояний. Значит, в предыдущей формулировке следует заменить «находящийся» на «находившийся» и убрать ставшее теперь лишним слово «также». Таким образом, $|\,\psi_\alpha(\beta)\,|^2$ *есть вероятность того, что микрообъект, находившийся в некотором α-состоянии, может быть обнаружен в том или ином β-состоянии*. Нетрудно видеть, что фактически здесь идёт речь уже о вероятности перехода микрообъекта из одного состояния в другое.

Интерференция амплитуд вероятностей переходов органически связана с одним из наиболее важных принципов квантовой физики — *принципом суперпозиции состояний.* Согласно этому принципу, между состояниями микрообъекта, отвечающими разным полным наборам, существует связь: любое состояние из одного набора может быть представлено в виде суперпозиции состояний другого набора. Например, данное α-состояние может быть представлено в виде суперпозиции β-состояний. Это представление запишем условно в виде:

$$\alpha\text{-состояние} = \sum_\beta \psi_\alpha(\beta) \times \beta\text{-состояние.} \tag{14}$$

Это соотношение можно рассматривать как разложение α-состояния по различным β-состояниям, причём коэффициентами разложения являются значения волновой функции $\psi_\alpha(\beta)$. Напомним: $|\,\psi_\alpha(\beta)\,|^2$ есть вероятность того, что микрообъект, находившийся в α-состоянии, может быть обнаружен в β-состоянии. Учитывая это, мы можем сказать, что

согласно (14) β-состояние «представлено» в α-состоянии с вероятностью $|\psi_\alpha(\beta)|^2$.

Принцип суперпозиции состояний как бы дополняет соотношения неопределённостей: его позитивное содержание «компенсирует» негативное содержание этих соотношений. Образно говоря, соотношения неопределённостей указывают на то «старое», от чего в квантовой физике надо отказаться; они требуют, в частности, отказаться от одновременной измеримости тех или иных физических величин. В то же время принцип суперпозиции состояний указывает на то «новое», чем надо пользоваться при рассмотрении микроявлений: суперпозиция (14) означает, что если микрообъект находится в состоянии, где измеримы величины α-набора, то значения величин β-набора могут быть предсказаны *вероятностно* — с вероятностью, равной $|\psi_\alpha(\beta)|^2$.

Соотношение (14) иногда интерпретируют так: находящийся в α-состоянии микрообъект в то же самое время пребывает в какой-то мере и в каком-то смысле также и в различных β-состояниях. Насчёт меры тут всё ясно: она определяется вероятностью $|\psi_\alpha(\beta)|^2$. Но вряд ли возможно пояснить слова «в каком-то смысле». Во всяком случае, буквальное представление о микрообъекте, как бы «размазанном» по разным состояниям, недопустимо. Можно сказать, что микрообъект находится в разных β-состояниях не реально, а потенциально. В измерительном акте суперпозиция (14) разрушается — из многих потенциальных возможностей реализуется какая-то одна: то конкретное β-состояние, в каком оказывается после измерения микрообъект.

В заключение сделаем одно формальное замечание по поводу соотношения, выражающего принцип суперпозиции состояний. Соотношение это математическое, а между тем в (14) осталась неразъяснённой математическая природа символов, обозначенных словами «α-состояние» и «β-состояние». Математически корректное выражение для принципа суперпозиции состояний может быть записано в виде:

$$\varphi_\alpha(x) = \sum_\beta \psi_\alpha(\beta)\chi_\beta(x). \qquad (15)$$

Здесь под x понимается ещё один полный набор величин (например, координаты микрообъекта); φ, ψ и χ — волновые функции. Не будем комментировать запись (15); надеемся, что читатель, внимательно изучивший предыдущие страницы, в силах осмыслить её самостоятельно. Отметим лишь, что (15) — это разложение функции $\varphi_\alpha(x)$ по функциям $\chi_\beta(x)$, отвечающим разным значениям β. Перед нами представление волновой функции $\varphi_\alpha(x)$ в виде суперпозиции волновых функций $\chi_\beta(x)$, причём в качестве коэффициентов разложения опять-таки выступает волновая функция (функция $\psi_\alpha(\beta)$).

Здесь уместно вспомнить суперпозицию (3). С учётом сделанных замечаний она означает, что состояние ψ_n можно рассматривать как суперпозицию состояний ψ_{ni}. В частности, можно считать, что в двухщелевом интерферометре в случае неразличимых альтернатив электрон находится в суперпозиционном состоянии — он как бы проходит сразу и через одну, и через другую щель. Попытка подсмотреть это «чудо» разрушает суперпозиционное состояние — и реализуется либо то, либо другое из двух состояний, составлявших суперпозицию.

Главное в квантовой физике. Если попытаться кратко сформулировать то главное, что дала квантовая физика человеку, познающему окружающий его мир, то хотелось бы, прежде всего, выделить следующие два момента.

Первый: квантовая физика показала, что основными (фундаментальными) закономерностями в природе являются закономерности не динамического, а статистического типа и что *вероятностная форма причинности есть основная форма*, тогда как классический (лапласовский) детерминизм представляет собой лишь предельный случай. Напомним,

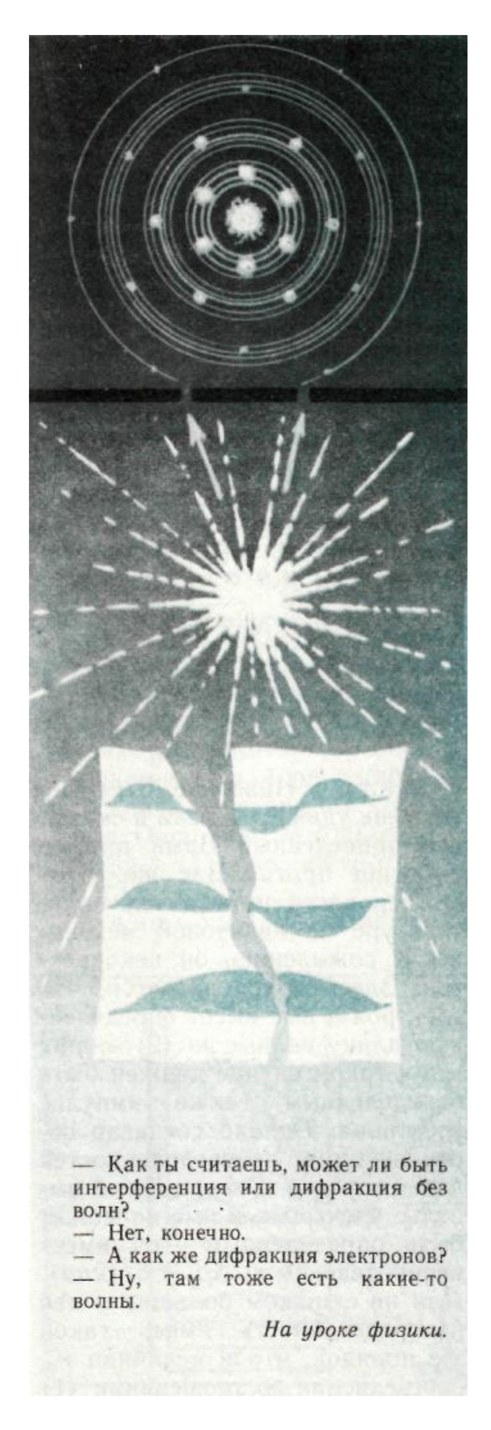
что в классической физике вероятностные закономерности стали применяться лишь с середины XIX в. При этом они использовались лишь при рассмотрении больших коллективов, а поведение отдельного объекта описывалось в рамках жёсткого детерминизма. Квантовая физика показала, что вероятностные закономерности применимы не только к коллективам, но и к отдельным объектам — *поведение уже одного микрообъекта имеет ярко выраженный вероятностный характер*.

Второй момент: квантовая физика обнаружила, что с вероятностями на уровне микроявлений следует обращаться не совсем так, как это практикуется в классических статистических теориях; оказалось, что в определённых случаях надо складывать не сами вероятности событий, а амплитуды этих вероятностей. *Не сама вероятность, а амплитуда вероятности (волновая функция) оказывается первичной величиной*. Сложение амплитуд вероятностей приводит к интерференционным эффектам, оно не имеет аналога в классической физике. С интерференцией амплитуд органически связан квантовофизический принцип суперпозиции состояний, отражающий специфику «взаимоотношений» состояний микрообъекта.

Отдельно необходимо отметить, что именно в квантовой физике особенно ярко и *глубоко проявилась присущая природе диалектика.* Квантовая физика показала, что характерный для классической физики метафизический подход к явлениям природы соответствует лишь первому этапу познания, что для более глубокого познания законов природы необходимо использование диалектического метода. Вопрос о диалектической сущности квантовой физики является для нас особо важным; мы возвратимся к нему в третьей главе книги.

Заметим, что интерференция амплитуд вероятностей в квантовой физике ставит вопросы интерференции волновых процессов как бы в новой плоскости. До появления квантовой физики интерференцию всегда рассматривали как пример специфически волнового явления. Если в каком-либо эксперименте обнаруживали характерную интерференционную картину, то это считалось безусловным основанием для вывода о присутствии неких волн. В этом смысле волны рассматривались как нечто *первичное*, а интерференция — как *вторичное*. Квантовая физика показывает, что более оправдана *противоположная* расстановка акцентов, и что в основе интерференционной картины отнюдь не обязательно должны лежать классические волновые процессы.

Диалог. О волнах и вероятностях в квантовой физике



Учитель. Мне не совсем понятно, почему выбрана такая тема для диалога.

Автор. В известном смысле здесь квинтэссенция понимания специфики квантовой физики (см. [122]).

Учитель. Но сегодня квантовая физика в школе не только не изучается, но порой даже не затрагивается.

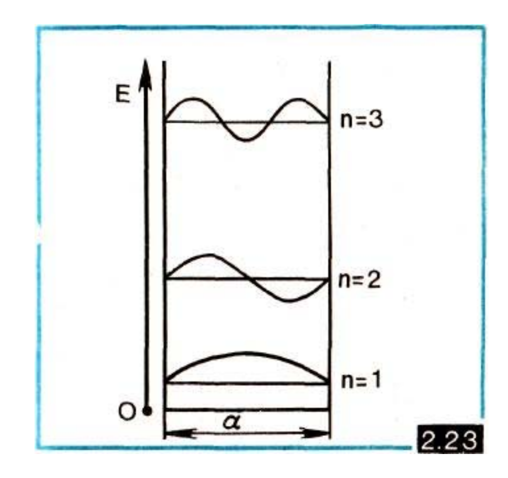
Автор. Возможно, в будущем ситуация изменится. А между тем уже сейчас приходится наблюдать не совсем правильную расстановку акцентов, встречающуюся при упрощённом изложении идей квантовой физики. Как-то мне довелось беседовать с достаточно развитым школьником, живо интересующимся новой физикой. Я спросил, в чём он видит специфику квантовой физики, в чём она, по его мнению, принципиально отлична от физики классической? Он ответил так: в квантовой физике световые волны рассматриваются как частицы, а прежние частицы, наоборот, рассматриваются теперь как волны.

Учитель. Мне кажется, он совсем неплохо ответил. Он видит специфику квантовой физики в корпускулярно-волновом дуализме.

Автор. Жаль, что, кроме дуализма, он больше ничего здесь не видит. Да и дуализм понимается, как правило, буквально, отнюдь не в духе квантовой физики. Беда в том, что во многих популярных изданиях, в ряде учебных пособий для студентов вузов и уж тем более в учебной литературе для школьников при рассмотрении вопросов квантовой физики излагаются (в той или иной мере) только волновые представления и при этом совсем или почти совсем не затрагиваются вероятностные представления. Нередко всю квантовую физику пытаются свести к неким специфическим волнам (волнам де Бройля).

Учитель. Но почему бы не пользоваться образом волны хотя бы условно? Ведь волны так наглядны.

Автор. Дело в том, что роль волновых представлений чрезмерно *преувеличивается*. По сути дела, не остается ничего, кроме волн. А в такой ситуации ни о какой условности волновых образов и речи быть не может. Волны воспринимаются совершенно реально, это некие вполне материальные волны, которые либо свободно распространяются в пространстве, либо «заперты» в атомах и молекулах, уподобляемых своеобразным резонаторам. И потом *совершенно недопустимо игнорировать вероятностные представления*. Без них нельзя понять то главное, что есть в квантовой физике (об этом подробно рассказывалось в § 8).



Учитель. И всё же надо признать, что волновые представления в квантовой физике могут быть очень полезными. В некоторых случаях они позволяют весьма просто и наглядно получить результат. Вот пример такой ситуации — электрон в прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Используя дебройлевскую волну электрона, можно очень просто получить выражение для уровней энергии электрона в яме. Надо потребовать, чтобы на ширине ямы a укладывалось целое число n электронных полуволн:

$$a = \frac{n\lambda_n}{2}. \quad (1)$$

При $n = 1$ имеем основное состояние электрона в яме (энергия E_1), при $n = 2$ — первое возбуждённое состояние (E_2), при $n = 3$ — следующее возбужденное состояние (E_3) и т. д. (рис. 2.23). Учитывая, что

$$\lambda_n = \frac{h}{p_n} \quad (2)$$

(p_n — импульс электрона на n-м уровне) и что

$$p_n = \sqrt{2mE_n} \quad (3)$$

получаем из (1): $a = \frac{nh}{\sqrt{8mE_n}}$. Таким образом,

$$E_n = \frac{n^2h^2}{8ma^2} \quad (4)$$

Автор. Наверное, Вы будете очень удивлены, если я скажу, что приведённый Вами пример работает *против* Вас же. Этот пример часто приводится в литературе по квантовой механике. К сожалению, он некорректен. Здесь предполагается, что электрон в яме имеет определённую длину волны; из (2) видно, что в таком случае должен быть определённым также импульс электрона. Однако согласно соотношениям неопределённостей для импульса и координаты импульс электрона в яме не может быть определённым — он имеет неопределённость $\Delta p_n \gtrsim \frac{h}{2\pi a}$. Для не слишком больших n эта неопределённость имеет такой же порядок, что и величина p_n, определяемая соотношениями (1) и (2). Значит, даже приблизительно нельзя считать, что каждому уровню в яме отвечает своё определённое значение импульса электрона (определённая длина волны). Таким образом, рисунок 2.23 оказывается бессмысленным — нельзя уподоблять электрон в яме классической стоячей волне в некоем резонаторе! Кстати, в серьёзных книгах по квантовой механике (см., на-

пример, [61]) можно найти выражение для вероятности того, что при измерении импульса электрона на n-м уровне в яме будет получено значение в интервале от p до $p+dp$. Не определённое значение импульса, а вероятность того или иного значения!

Учитель. Но ведь результат (4), насколько я знаю, верен!

Автор. Результат действительно верен. Дело в том, что в Ваших рассуждениях была допущена не одна, а две ошибки — произошла их взаимная компенсация. Ошибочно не только соотношение (1), но и соотношение (3).

Учитель. Соотношение (3) — это известная связь между энергией и импульсом: $E = p^2 / 2m$. Разве она не годится для микрообъектов?

Автор. Она годится, если микрообъект свободен. Для микрообъекта в связанном состоянии она не годится. Да и как она может годиться, если у электрона в яме энергия определённая, а импульс неопределённый?

Итак, как Вы убедились, приведённый пример с электронными волнами в потенциальной яме оказался на поверку неудачным. Неправомерно проводить аналогию между электроном в яме и классической волной внутри резонатора. Этот пример учит нас относиться с осторожностью к волновым моделям в квантовой физике. *У учащихся не должны возникать иллюзии относительно дебройлевских волн*. Они нисколько не похожи на реальные волны. Собственно говоря, этих волн попросту нет.

Учитель. Но с помощью только «волновых характеристик» микрообъектов трудно объяснить их дифракцию.

Автор. В том-то и дело, что *интерференцию и дифракцию микрообъектов следует объяснять не на основе волновых представлений, а используя вероятностные представления*. Здесь никак не избежать вероятностей. В § 8 было показано: интерференция микрообъектов обусловлена тем, что при определённых условиях происходит сложение не вероятностей микрособытий, а амплитуд вероятностей. *Интерференция микрообъектов — это, в конечном счёте, интерференция амплитуд вероятностей*.

Учитель. Всё же очень непривычно рассматривать интерференцию без волн.

Автор. Надо привыкать, коль скоро электронные волны в действительности не существуют.

Учитель. А как быть с фотонными волнами? Существуют же *классические световые волны*.

Автор. Здесь иная ситуация. Будучи бозонами, фотоны проявляют тенденцию к накоплению в одном и том же состоянии. При достаточно большом числе фотонов в одном состоянии и возникает световая волна; её параметры (волновой вектор, частота, поляризация) совпадают с соответствующими волновыми характеристиками фотона (это есть характеристики того состояния, в котором произошло накопление фотонов). Классическая волна возникает как коллективный эффект. Для электронов же, как и других фермионов, подобный коллективный эффект принципиально невозможен, поскольку фермионы могут заселять состояния только поодиночке. Поэтому и не существуют классические электронные и вообще фермионные волны.

Учитель. Получается, что есть две интерференции: классическая, обусловленная сложением волн, и квантово-физическая, обусловленная сложением амплитуд вероятностей?

Автор. Именно так. Классическая интерференция наблюдается только для бозонных коллективов. В обычных условиях она как бы маскирует квантово-физическую интерференцию. Но в случае фермионов, например электронов, такой маскировки нет — там наблюдается только квантово-физическая интерференция.

Учитель. А нельзя ли квантово-физическую интерференцию рассматривать по аналогии с классической, используя некие условные волны? Объяснение на языке вероятностей страдает отсутствием наглядности.

Автор. Зато это объяснение является более глубоким по сравнению с объяснением на языке волн.

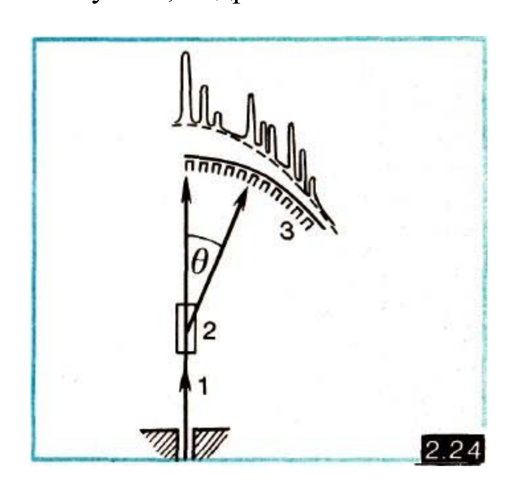
Учитель. А в чём именно проявляется *глубина* вероятностного подхода? В конце концов волны де Бройля нисколько не хуже объясняют возникновение интерференционной картины, нежели интерферирующие амплитуды вероятностей. Более того, волны дают наглядное объяснение.

Автор. Волны могут объяснить *возникновение* интерференционной картины в случае, когда альтернативы неразличимы, однако они не объясняют *разрушение* интерференции в случае, когда альтернативы оказываются различимыми. Получается, что пока мы не светим на щели интерферометра, микрообъекты ведут себя как волны, но лишь только мы включаем свет, упомянутые волны немедленно исчезают. Если источник света выключен, «волны материи» существуют, если включен — «волны материи» исчезают.

Учитель. Это можно попробовать объяснить тем, что, включая или выключая свет, мы тем самым воздействуем на условия, в которых осуществляется эксперимент.

Автор. Можно рассмотреть ситуацию, когда нет никаких изменений условий эксперимента. Я имею в виду опыты по дифракции очень медленных нейтронов на кристалле. Оставаясь в рамках волновых представлений, нам пришлось бы здесь допустить, что «волны материи» *одновременно* (!) *и присутствуют, и отсутствуют*. Согласитесь, что это выглядит абсурдно.

Учитель. Расскажите, пожалуйста, подробнее об этих опытах.



Автор. Рассмотрим эксперимент, схема которого показана на рисунке 2.24. Здесь: *1* — исходный пучок нейтронов (пучок монохроматичен и хорошо коллимирован, энергия нейтронов порядка 0,1 эВ), *2* — кристалл, *3* — детекторы, регистрирующие нейтроны, рассеянные на разные углы θ. Распределение попаданий нейтронов в детекторы описывается кривой, изображённой на том же рисунке. Она представляет собой наложение чётких интерференционных максимумов на некий фон, описываемый плавной штриховой кривой. Получается, что *одни нейтроны ведут себя как волны* (они обусловливают интерференционные максимумы), а в то же самое время *другие нейтроны волновых свойств не обнаруживают* (они распределяются в соответствии с плавной штриховой кривой).

Учитель. Действительно, всё это выглядит довольно нелепо.

Автор. Однако результаты опыта получают разумное объяснение, если оставить в покое волны, а использовать *вероятностный подход*. Пусть $\varphi_i(\theta)$ — амплитуда вероятности рассеяния нейтрона на i-м атомном ядре кристаллической решётки на угол θ. В кристаллическом образце N ядер, и, следовательно, имеются N альтернатив — каждая отвечает рассеянию нейтрона на соответствующем ядре. Если альтернативы неразличимы (ядра предполагаются тождественными), то вероятность нейтрону рассеяться на угол θ есть

$$|\varphi(\theta)|^2 = |\sum_{i=1}^{N} \varphi_i(\theta)|^2 . \qquad (5)$$

Это выражение аналогично выражениям (4) и (6) из § 8; оно объясняет возникновение ин-

терференционных пиков в картине распределения рассеянных нейтронов. Однако даже при условии, что все ядра кристалла тождественны, альтернативы не всякий раз оказываются неразличимыми. Есть вероятность того, что при рассеянии какого-то нейтрона произойдёт изменение направления (переворачивание) его спина. Тогда в соответствии с законом сохранения момента импульса должно измениться направление спина ядра-рассеивателя. Теперь ядро, на котором произошёл акт рассеяния, оказывается *физически выделенным* — это есть то самое ядро, спин которого изменил направление. Поэтому для таких нейтронов надо складывать не амплитуды, а сами вероятности (напомним выражение (2) из § 8):

$$|\psi(\theta)|^2 = |\sum_{i=1}^{N} \psi_i(\theta)|^2 . \tag{6}$$

Мы ввели для амплитуды рассеяния с переворачиванием спина обозначение ψ; прежнее обозначение (φ) относится к нейтронам, которые рассеялись без переворачивания спина. Результирующая вероятность рассеяния на угол θ есть

$$w(\theta) = |\varphi(\theta)|^2 + |\psi(\theta)|^2 . \tag{7}$$

Таким образом, мы убеждаемся, что кривая на рисунке 2.24 получает естественное объяснение не на языке волн, а на языке вероятностей.

Учитель. Всё это, конечно, достаточно убедительно. В самом деле, следовало бы при изучении квантовой физики сместить акценты с волн на вероятности. Не целесообразно было бы поубавить волновой терминологии?

Автор. Важно, в конечном, счёте, не *какие* термины употребляются, а *как* они употребляются. Волновой терминологией пользоваться можно, но важно понимать её условность, важно помнить, что в микроявлениях фундаментальную роль играют не волновые, а вероятностные представления. А как будет называться основная фигура в квантовой физике — «волновой функцией» или «амплитудой вероятности» — это непринципиально. Как сказал Гёте,

Нет подходящих соответствий
И нет достаточных имён.
Всё дело в сути, а названье
Лишь дым, которым блеск сиянья
Без надобности затемнён.

§ 9. СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Особенности научно-технической революции; роль современной физики. Научно-техническая революция (НТР) началась в середине нашего столетия. Характеризуя её особенности, академик Б. М. Кедров писал: «Революции в области науки и техники совершались не раз в прошлом. Но раньше они происходили независимо одни от других и лишь случайно иногда совпадали во времени. Первая особенность НТР состоит в том, что обе революции — в науке и технике — слились теперь в единый нераздельный процесс. Вторая особенность: НТР — это не простое совпадение во времени двух революций, но такое их соединение, когда обе революции взаимно влияют друг на друга, находятся в закономерной связи между собой. Наконец, третья и самая важная особенность НТР: развитие науки опережает развитие техники, как бы прокладывая путь для дальнейшего её развития» [54, с. 68].

На третьей и самой важной особенности НТР необходимо остановиться подробнее. В XIX в. движущей силой научно-технического прогресса были техника и производство. Они, как правило, опережали в своём развитии науку, ставили перед ней конкретные задачи, влияли на направления и темпы её развития. Так, изобретение паровой машины инициировало бурное развитие термодинамики. В XX в. ситуация коренным образом изменилась; теперь роль движущей силы прогресса стала играть наука (естествознание). Развитие науки и прежде всего физики стало решающим фактором, определяющим в наше время развитие техники. Без преувеличения можно утверждать, что именно успехи современной физики во многом определили возникновение и развитие НТР.

Нельзя представить себе НТР без трёх выдающихся изобретений века — *транзистора, лазера, атомного реактора*. С изобретением транзистора (1948) связано развитие современных средств передачи информации, вычислительной техники, космонавтики, робототехники. С изобретением лазера (1960) связано создание качественно новых технологий в обработке материалов и медицине, появление новых возможностей в развитии локации и измерительной техники, в совершенствовании систем контроля, связи, обработки и хранения информации. С изобретением атомного реактора (1942) связано создание атомных двигателей, возникновение атомной энергетики.

Все эти три выдающихся изобретения были предопределены развитием современной физики. Транзистор появился благодаря возникновению и развитию физики твёрдого тела и её особой ветви — физики полупроводников. Лазер — результат развития квантовой электроники, физики твёрдого тела, физики плазмы. Атомный реактор — детище ядерной физики. Налицо, как видим, характерное для НТР опережающее развитие науки, прокладывающей пути для развития техники. Надо подчеркнуть, что все перечисленные здесь физические направления, в свою очередь, берут начало от квантовой физики. В этом смысле квантовая физика может рассматриваться как теоретическая основа современного научно-технического прогресса. Отметим, что в развитии ядерной физики важную роль сыграли также идеи теории относительности.

Учитель. Мне понравилось, что из многообразных технических изобретений нашего времени Вы выделили транзистор, лазер, атомный реактор. Наверное, этот перечень можно было бы расширить. Однако нет сомнения в том, что эти три изобретения сыграли принципиально важную роль в НТР.

Автор. По этой причине транзистор, лазер и атомный реактор должны, как мне кажется, достаточно основательно рассматриваться в школьном курсе физики.

Учитель. Вы имеете в виду технические подробности?

Автор. Как раз нет. Я имею в виду физику процессов, происходящих в транзисторе,

лазере, атомном реакторе. Чисто *описательный* подход в данном случае недостаточен. Школьники должны понимать физику соответствующих процессов, основанную, в конечном счёте, на *идеях квантовой физики*.

Учитель. Нельзя понять физику транзистора, не имея представления об энергетических зонах и примесных уровнях в полупроводниках, не зная, что такое $p-n$-переход.

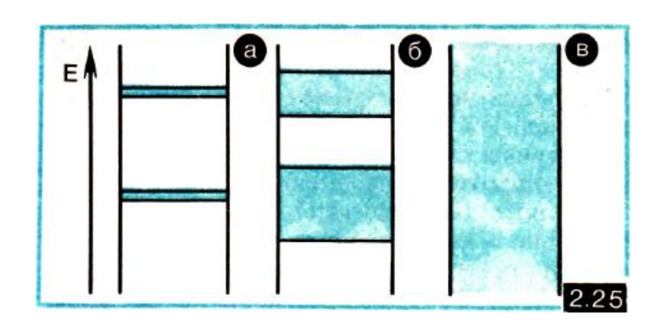
Автор. Вы попали в самую точку. Очень важно предварительно рассмотреть с учащимися ряд вопросов, относящихся к физике полупроводников, квантовой электронике, ядерной физике. Причём все упомянутые вопросы должны рассматриваться на основе идей квантовой физики, а также теории относительности. Представляется целесообразной такая «цепочка»: фундаментальные физические теории $\rightarrow$ специальные вопросы современной физики $\rightarrow$ физика работы транзистора, лазера, атомного реактора $\rightarrow$ развитие современной техники.

Учитель. Вы предлагаете реализовать такую «цепочку» на практике преподавания физики в школе?

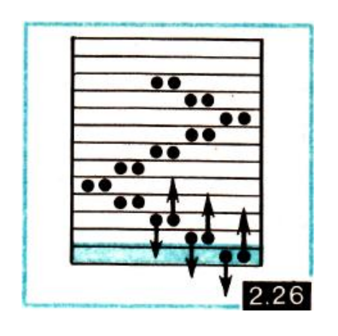
Автор. Во всяком случае, она мне кажется разумной. Именно так можно было бы раскрыть перед школьниками тему «Современная физика и НТР» — без общих разговоров, на конкретном материале.

Ранее мы уделили внимание фундаментальным физическим теориям — квантовой и теория относительности. Теперь, опираясь на них, рассмотрим некоторые вопросы современной физики, связав их с физикой транзистора, лазера, атомного реактора.

Элементы физики твёрдого тела. *Энергетические зоны в кристаллах.* На рисунке 2.25 показаны разрешённые значения энергии электрона (они закрашены) для трёх случаев а) электрон в атоме, б) электрон, обобществлённый кристаллом в) свободный электрон. Прежде всего поясним, что такое обобществлённый электрон. При образовании из атомов кристалла те электроны атомов, которые были связаны с ядрами слабее всего (электроны внешних электронных оболочек), перестают быть «собственностью» своих атомов, а как бы «обобществляются» всем кристаллом; обобществлённый кристаллом электрон с равной вероятностью может быть обнаружен вблизи любого узла кристаллической решётки. Далее обратим внимание на то, что энергетические уровни электрона в атоме представлены на рисунке немного «размытыми»; степень их «размытия» ΔE определяется в соответствии с соотношением неопределённостей для энергии и времени: $\Delta E \approx h/\tau$, где h — постоянная Планка, а τ — среднее время жизни электрона в данном состоянии (напомним, что электрон может спонтанно перескочить с данного уровня на более низкий уровень). У свободного электрона никаких запретов на возможные значения энергии нет; его энергия изменяется непрерывно и может принимать любое значение (как и у классической корпускулы). Что же касается энергии обобществлённого электрона в кристалле, то она образует *зоны* (полосы); из рисунка хорошо видно, что этот случай является промежуточным между случаем электрона в атоме и свободным электроном. Наблюдается закономерность: *чем менее ограничено движение электрона, тем меньше ограничений и на его энергию.* Сильнее всего локализован электрон в атоме; в кристалле ограничение движения значительно меньше — обобществлённый электрон перемещается по всему кристаллу; у свободного электрона нет никаких ограничений на движение.

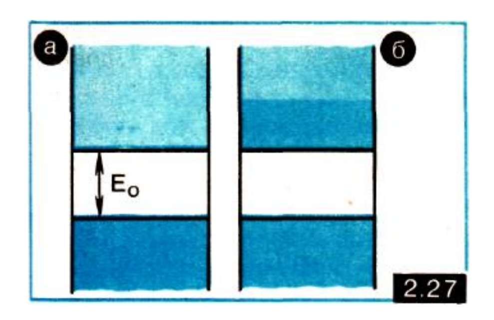


2.25


2.26

Рассмотрим *энергетическую зону* пристальнее. Строго говоря, её следует представлять в виде набора огромного числа слегка размытых взаимно перекрывающихся уровней (рис. 2.26). Каждому из них отвечают два электронных состояния, и, значит, на каждом таком «уровне» могут находиться два электрона (напомним, что электроны относятся к фермионам, они подчиняются принципу запрета Паули); эти два электрона имеют противоположно ориентированные спины. Предположим, что полное число мест для электронов (число электронных состояний) в зоне равно N, а число самих электронов в данной зоне $N/2$; значит, такая зона будет заполнена электронами наполовину. Возможна разная степень заполненности зон электронами; в частности, зона может быть заполнена электронами полностью или, напротив, полностью свободна.

Диэлектрики и металлы. Характер заполнения зон электронами позволяет объяснить, почему диэлектрики не проводят электрического тока, а металлы, напротив, проводят. Обратимся к рисунку 2.27. На нём представлены диэлектрик (*а*) и металл (*б*). В обоих случаях изображены по две зоны — *зона проводимости* (верхняя) и *валентная зона* (нижняя). Для нас интересны только эти две зоны, так как все более высокие зоны всегда полностью свободны, а все более низкие зоны всегда полностью заполнены. Между рассматриваемыми зонами есть область запрещённых значений энергии шириной E_0; её называют «запрещённой зоной». Заметим, что ширина запрещённой зоны, а также различных энергетических зон различна, к тому же она меняется от материала к материалу.



Из рисунка видно, что у диэлектрика валентная зона *полностью заполнена*, а зона проводимости *полностью свободна*. Этим и объясняются диэлектрические свойства материала. Пусть к нему приложено напряжение. Чтобы при этом возник электрический ток, необходимо, во-первых, наличие электронов в зоне и, во-вторых, возможность для этих электронов немного увеличить свою энергию (под действием приложенного напряжения). В зоне проводимости в данном случае электронов нет. Валентная же зона заполнена электронами полностью, поэтому здесь электроны не могут сместиться вверх; по шкале энергии; им просто некуда смещаться — ведь все «уровни» в зоне заняты. Электроны в валентной зоне могут лишь обмениваться друг с другом местами (энергией), но не могут взять энергию от приложенного внешнего электрического поля. Они участвуют в тепловом движении, но не могут упорядоченно перемещаться под действием поля, т. е. *не могут создавать электрический ток*.

Иное дело — металл. В зоне проводимости металла есть и электроны, и свободные места; поэтому в данном случае электроны могут участвовать в создании электрического тока, иными словами, могут играть роль *носителей тока*.

Полупроводники. Предположим, что ширина запрещённой зоны на рисунке 2.27, *а*, относящемся к диэлектрику, стала относительно малой — менее 1 эВ. Теперь надо учитывать квантовые переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости (квантовые скачки через запрещённую зону снизу вверх). Энергия для таких переходов берётся за счёт внутренней энергии кристалла, иначе говоря, за счёт энергии теплового движения. В результате появляются электроны в зоне проводимости и свободные места в валентной зоне. Перед нами уже не диэлектрик, а *полупроводник*.

Электроны в зоне проводимости полупроводника являются, очевидно, носителями то-

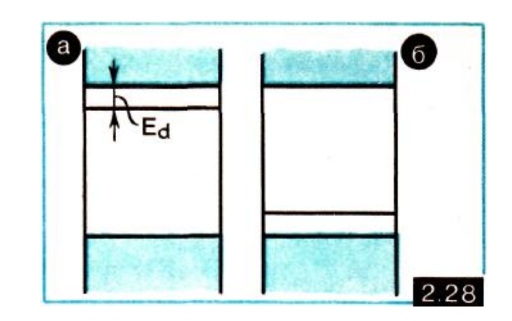
ка. Так как валентная зона теперь заполнена не до конца, то она тоже будет вносить вклад в возникновение тока. Для пояснения воспользуемся весьма условной аналогией: вообразим поставленные в ряд стулья и предположим, что все стулья заняты, кроме крайнего. Перенумеруем сидящих на стульях, начиная от свободного стула: 1, 2, 3, ... Представим далее, что № 1 пересел на свободный стул, затем № 2 пересел на стул, где раньше сидел № 1, затем № 3 пересел на стул, где раньше сидел № 2, и т. д. По мере этих пересаживаний свободное место как бы перемещалось от одного края ряда к другому. Так и в валентной зоне — вместо перемещения электронов под действием поля удобно рассматривать перемещение в обратном направлении «свободного места»; для него есть и подходящее название — *дырка*. Итак, переход электрона из валентной зоны в зону проводимости приводит к возникновению *сразу двух носителей тока* — электрона в зоне проводимости и положительно заряженной дырки в валентной зоне.

Переходы электронов через запрещённую зону снизу вверх происходят всё время; однако не наблюдается непрерывное возрастании числа электронов в зоне проводимости (и соответственно дырок в валентной зоне). Дело в том, что наряду с переходами снизу вверх происходят также обратные переходы. Это спонтанные переходы; они приводят к тому, что всякий раз уничтожается носитель тока в зоне проводимости и носитель тока (дырка) в валентной зоне (как говорят, происходит рекомбинация электрона проводимости и дырки). В итоге при данной температуре кристалла устанавливается *динамическое равновесие*: число переходов в единицу времени снизу вверх *уравновешивается* числом переходов сверху вниз, так что в каждой зоне будет всё время сохраняться постоянное число носителей тока (одинаковое для обеих зон).

Если температура полупроводника вдруг понизится, переходы сверху вниз станут на некоторое время *преобладать* над переходами снизу вверх; число носителей тока будет *уменьшаться*. Затем равновесие снова восстановится, но уже при меньшем (чем раньше) числе носителей. Наоборот, при возрастании температуры станут на некоторое время преобладающими переходы снизу вверх, число носителей тока возрастёт. Таким образом, в полупроводнике число носителей тока (а значит, и электрическая проводимость) довольно существенно *зависит от температуры* — с повышением температуры *электропроводимость полупроводника быстро растёт*.

Заметим, что проводимость металла меняется с температурой далеко не столь сильно, как у полупроводника, а главное, не растёт с нагреванием, а, напротив, уменьшается. Это происходит из-за того, что с нагреванием кристалла атомы в кристаллической решётке колеблются интенсивнее и тем самым создают более серьёзную помеху перемещению носителей тока. Конечно, этот эффект есть также в полупроводнике, но там он с лихвой перекрывается увеличением числа носителей тока с ростом температуры.

<u>*Примесные полупроводники.*</u> До сих пор речь шла о чистых (беспримесных) полупроводниках. На практике чаще применяются примесные полупроводники, имеющие небольшую примесь посторонних атомов (ионов). Примеси обусловливают появление в пределах запрещённой зоны одного или более *примесных энергетических уровней*. Электрон в примесном атоме — это не обобществлённый кристаллом электрон. Он локализован в пределах атома; поэтому и возникает дополнительный уровень, а не зона.



Рассмотрим два случая; их иллюстрирует рисунок 2.28. В случае (*а*) примесный уро-

вень находится вблизи «дна» зоны проводимости — на расстоянии $E_d \approx 0,01$ *эВ* от него. Такой уровень образуется, когда примесные атомы имеют на внешней оболочке на электрон больше, чем основные атомы (валентность примесного атома на единицу больше валентности основного). Избыточные электроны примесных атомов как раз и находятся на примесном уровне. Впрочем, слово «находятся» не вполне годится: уже при небольших температурах (порядка всего 10 K) электроны с этого уровня перескакивают в зону проводимости, т. е. покидают свои примесные атомы и обобществляются кристаллом (при этом, конечно, никаких дырок в валентной зоне не образуется). Поэтому подобные примесные полупроводники, а также примесные уровни в них называют *донорными;* примесный уровень выступает здесь в роли донора — он снабжает электронами зону проводимости. Примером может служить полупроводниковый кристалл германия с примесью мышьяка ($E_0 = 0,65$ *эВ*, $E_d = 0,013$ *эВ*); напомним, что германий четырёхвалентен, а мышьяк пятивалентен.

В случае (*б*) (см. рис. 2.28) примесный уровень находится вблизи «вершины» валентной зоны; он образуется в полупроводниках с примесными атомами, имеющими на внешней оболочке на один электрон меньше, чем основные атомы (валентность примесного атома на единицу меньше валентности основного). Уже при температурах порядка 10 K электроны валентной зоны переходят на примесный уровень, т. е. захватываются примесными атомами; при этом в зоне появляются дырки. Подобные полупроводники и примесные уровни называют *акцепторными*; примесный уровень выступает здесь в качестве акцептора (захватчика) — он захватывает электроны из валентной зоны (и тем самым снабжает её дырками). Примером может служить германий с примесью трёхвалентного бора.

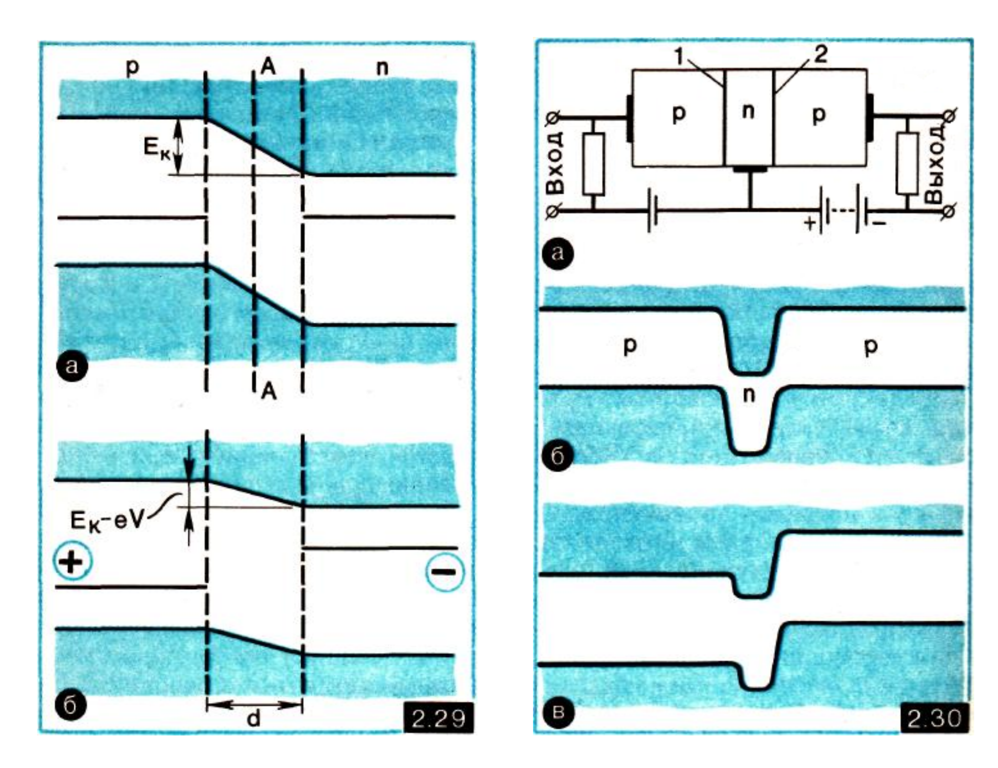
Донорные примесные уровни истощаются, а акцепторные насыщаются электронами при температурах порядка 10 K. При дальнейшем увеличении температуры постепенно включаются в игру междузонные переходы (из валентной зоны в зону проводимости) — как и в беспримесных полупроводниках. При переходах донорный уровень $\to$ зона проводимости рождаются только отрицательно заряженные носители тока — электроны проводимости, а при переходах валентная зона $\to$ акцепторный уровень — только положительно заряженные носители — дырки. При междузонных переходах и те, и другие рождаются в одинаковом количестве. В итоге в донорных полупроводниках всегда больше электронов проводимости, чем дырок, а в акцепторных — наоборот (разница тем сильнее, чем больше примесных атомов в полупроводнике). Поэтому донорные полупроводники называют также полупроводниками *n*-типа (*negative* — отрицательный), а акцепторные — *p*-типа (*positive* — положительный).

Электронно-дырочный переход (p – n-переход). Так называют контакт полупроводников *p*-типа и *n*-типа. При образовании такого контакта электроны проводимости из *n*-полупроводника, где их в миллионы раз больше, чем в *p*-полупроводнике, начинают переходить через контакт в *p*-полупроводник; в обратном направлении происходит переход дырок. В результате *n*-полупроводник заряжается положительно, а *p*-полупроводник — отрицательно; между полупроводниками возникает разность потенциалов V_k. создающая энергетический порог высотой $E_k = eV_k$, где *e* — заряд электрона (дырки). Этот порог препятствует дальнейшему некомпенсированному переходу электронов в *p*-полупроводник и дырок в *n*-полупроводник. Рисунок 2.29, *а* иллюстрирует рассматриваемую ситуацию; здесь слева энергетические зоны *p*-полупроводника, а справа — *n*-полупроводника, *d* — толщина приконтактного слоя, в пределах которого сосредоточивается объёмный заряд (положительный справа от линии контакта *AA* и отрицательный слева от неё).

Предположим, что к $p-n$-переходу приложено напряжение *V* в *прямом направлении* (плюс к *p*-полупроводнику и минус к *n*-полупроводнику); такой переход называют *прямым*. В этом случае высота энергетического порога уменьшится — она станет равной

$E_k - eV$ (см. рис. 2.29, *б*); поэтому через переход потечёт ток.

Если же к $p-n$-переходу приложить напряжение в *обратном направлении* (*обратный* переход), то порог, напротив, возрастёт — он станет равен $E_k + eV$. Ясно, что ток через обратный переход не течёт; переход заперт. Прикладывая к $p-n$-переходу напряжение в прямом направлении, мы как бы открываем переход, а в обратном — запираем. Отсюда видно, что $p-n$-переход может служить выпрямителем переменного электрического тока.



Физика транзистора. *Плоскостной* $p-n-p$*-транзистор* образован двумя *p*-полупроводниками и расположенным между ними *n*-полупроводником; он содержит два $p-n$-перехода (можно было бы также взять $n-p-n$-транзистор — два *n*-полупроводника и между ними *p*-полупроводник). Рассмотрим электрическую схему, изображённую на рисунке 2.30, *а* (здесь *1* — прямой переход, *2* — обратный переход; левый *p*-полупроводник называют *эмиттером*, правый — *коллектором*, *n*-полупроводник называют *базой*). На рисунке 2.30, *б* изображены энергетические зоны полупроводников, когда ни на эмиттер, ни на коллектор напряжение не подано (напомним в связи с этим рис. 2.29, *а*). На рисунке 2.30, *в* изображены зоны при наличии напряжения в схеме. Через прямой переход *1* из эмиттера в базу переходят дырки. Существенно, что толщина базы весьма мала — измеряется тысячными долями сантиметра. Поэтому инжектированные в базу из эмиттера дырки проскакивают базу и попадают в коллектор, создавая ток в цепи коллектора. Напряжение, создаваемое батареей цепи коллектора, значительно больше напряжения в цепи эмиттера. Поэтому относительно слабый сигнал, подаваемый на вход схемы (в цепь эмиттера), превращается в усиленный сигнал на выходе схемы. Усиление происходит по напряжению и мощности.

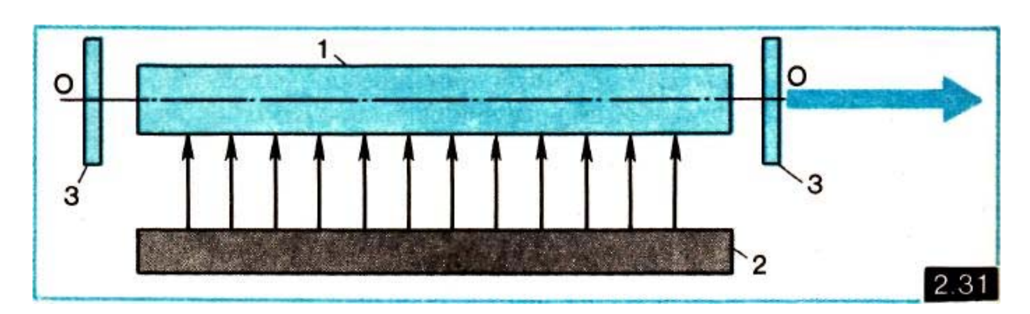
В отличие от электронных ламп, усилители на транзисторах не имеют накаливаемого катода. Кроме того, они в десятки и сотни раз меньше по размерам и по массе и работают при более низких напряжениях. Недаром транзисторы получили очень широкое применение в современной электронике, почти полностью вытеснив электронные лампы.

Может ли свет усиливаться, проходя через вещество? Как известно, при прохождении через вещество свет ослабляется. Однако возможно также *усиление* света. Пусть через коллектив атомов, часть которых находится на уровне E_1, а часть на уровне E_2

($E_2 > E_1$), распространяется световой пучок, состоящий из фотонов с энергией $h\nu = E_2 - E_1$. Атомы, находящиеся на уровне E_1 могут поглотить по фотону и перейти на уровень E_2 — это способствует ослаблению светового пучка. Атомы же, находящиеся на уровне E_2, могут под воздействием фотонов пучка перейти на уровень E_1 с испусканием фотона $h\nu$ (процесс вынужденного испускания света) — это способствует усилению пучка. Что будет преобладать — ослабление пучка вследствие поглощения фотонов атомами или усиление за счёт вынужденного испускания? Известно, что вероятность поглощения фотона атомом на уровне E_1 равна вероятности того, что фотон вызовет вынужденное испускание в атоме, находящемся на уровне E_2; обе вероятности пропорциональны плотности светового излучения, инициирующего рассматриваемые процессы. Это было показано уже в работах Эйнштейна (см. § 7). Значит, всё дело в том, *каких атомов больше* — тех, которые находятся на уровне E_1, или тех, которые находятся на уровне E_2. Если атомов больше на уровне E_1, то чаще будут происходить акты поглощения фотонов атомами — в результате световой пучок будет ослабляться. Если же большинство атомов окажется на уровне E_2, то чаще будут происходить акты вынужденного испускания фотонов; в этом случае вынужденное испускание света должно преобладать над поглощением и в результате световой пучок усилится. Обычно, чем выше уровень энергии, тем меньше на нём атомов; поэтому-то обычно световой пучок ослабляется, проходя через вещество. Следовательно, для усиления пучка надо создать необычную ситуацию — *когда число атомов на более высоком уровне больше, чем на нижнем*. Как говорят, надо создать *инверсную (обращённую)* заселённость энергетических уровней в веществе.

Итак, надо пропускать световой пучок через среду с инверсной заселённостью уровней. Для приготовления такой среды можно воспользоваться, например, вспомогательным излучением, которое перебросит значительную часть атомов на верхние уровни. Возможны также иные пути возбуждения атомов, скажем, электрический разряд в газе.

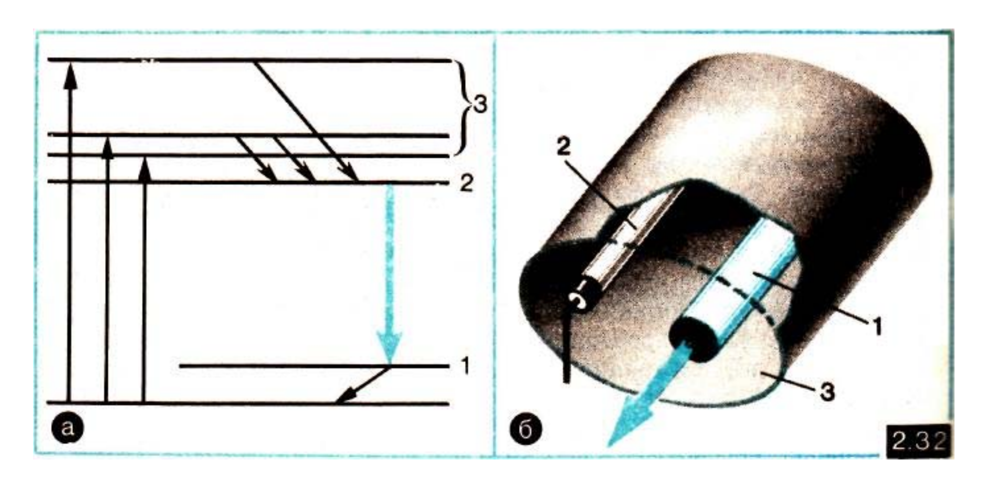
Физика лазера. Принципиальная схема лазера проста: см. рисунок 2.31 (*1* — активный элемент, *2* — устройство накачки активного элемента, *3* — зеркала, образующие резонатор; одно из них частично прозрачно — через него выходит лазерное излучение).



«Сердце» лазера — это его *активный элемент*. Он отдалённо напоминает кекс с изюмом. «Изюминками», или *активными центрами*, являются ионы (атомы, молекулы), обладающие следующим свойством: оказавшись на одном из своих возбуждённых энергетических уровней, они могут относительно долго оставаться там, не торопясь спонтанно соскочить на нижние уровни. Поэтому можно накопить достаточно много активных центров на таком уровне — так, что их станет там значительно больше, чем на нижних уровнях. В результате будет создана инверсная заселённость уровней, что, как мы знаем, необходимо для преобладания вынужденного испускания света над поглощением.

Для примера рассмотрим конкретный активный элемент — *гранат с неодимом*. Гранат (точнее, иттриево-алюминиевый гранат) представляет собой прозрачный кристалл; активные центры — ионы неодима, они вводятся в кристалл в процессе изготовления активного элемента. На рисунке 2.32, *а* показана упрощённо система уровней иона неодима

в гранате. Поглощая излучение специальной лампы-осветителя, ионы неодима возбуждаются: переходят на уровни *3*. Затем они очень скоро соскакивают с этих уровней и накапливаются на уровне *2*, отдавая избыток энергии на нагревание кристалла. Активный элемент будет готов к работе тогда, когда на уровне *2* накопится значительно больше ионов неодима, чем их имеется на уровне *1*. Теперь достаточно «сигнала», роль котором сыграет фотон с энергией, равной разности энергий уровней 2 и 1, чтобы произошёл дружный переход ионов неодима с уровня *2* на уровень *1*. В результате возникнет лавина фотонов, которая и будет представлять собой лазерное излучение.



На рисунке 2.32. *б* показано, как на практике осуществляют возбуждение активных центров в лазере на гранате с неодимом. Активный элемент *1* и лампа-осветитель *2*, имеющие цилиндрическая форму, помещены внутри отражателя *3*. Почти вся световая энергия лампы концентрируется на активном элементе.

Говоря о возбуждении активных центров, применяют термин «накачка» (активные центры как бы накачиваются энергией, накапливаясь на соответствующем уровне). В нашем примере применяется *оптическая накачка*. Возможна оптическая накачка мощными световыми импульсами, генерируемыми лампой-вспышкой, — в ответ на каждый импульс накачки возникает импульс лазерного излучения (*импульсная* оптическая накачка). Возможно также непрерывное облучение активного элемента (*непрерывная* оптическая накачка); в этом случае лазерное излучение может представлять собой непрерывный луч или регулярную последовательность световых импульсов.

Примечание. Лазеры с активными элементами в виде специально изготовленных кристаллических или стеклянных стержней называют *твердотельными*. Существуют также другие типы лазеров. Среди них отметим *газоразрядные* и *полупроводниковые* лазеры. В газоразрядных активный элемент — специально подобранная смесь газов; роль активных центров играют определённые атомы, ионы или молекулы, входящие в эту смесь (в лазере на гелии и неоне активные центры — атомы неона, в CO_2-лазере — молекулы углекислого газа). Для накачки газоразрядных лазеров используют электрический разряд. Полупроводниковые лазеры накачивают оптически, бомбардировкой электронным пучком, но чаще за счёт энергии внешнего электрического поля, приложенного к $p-n$-переходу (инжекционные лазеры).

Но вернёмся к физике процессов в лазере. Итак, накачка обеспечивает инверсную заселённость уровней активных центров. Если теперь направить через активный элемент световой пучок соответствующей частоты, то он будет не ослабляться, а усиливаться. Всё так и происходит в приборах, называемых *квантовыми усилителями света*. Лазер же является не усилителем, *а генератором* света; здесь нет первичного светового пучка. Поэтому важно понять, как же начинается или, точнее говоря, *зарождается* генерация лазерного излучения.

Всё начинается со *спонтанного испускания* света. Роль первичных фотонов, иници-

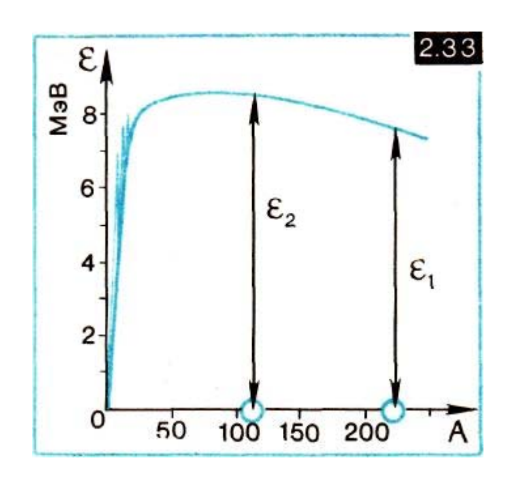
рующих испускание новых (вторичных) фотонов и тем самым дающих начало процессу лазерной генерации, играют фотоны, родившиеся при спонтанных переходах активных центров с уровня *2* на уровень *1* (мы используем систему уровней на рис. 2.32). Каждый спонтанно родившийся фотон может, в принципе, инициировать рождение целой лавины вторичных фотонов, летящих в том же направлении, что и первичный фотон (напомним, что при вынужденном испускании вторичный фотон полностью копирует первичный фотон).

Но позвольте, может заметить внимательный читатель, ведь спонтанно рождающиеся фотоны испускаются активными центрами несогласованно во времени и притом в самых разных направлениях. Значит, в разных направлениях «побегут» и соответствующие лавины вторичных фотонов. Каким же образом возникает лазерный луч?

Недоумение читателя совершенно понятно. Чтобы получить лазерный луч, нужно както упорядочить описанную выше картину. Это делает *оптический резонатор*. В простейшем случае он представляет собой два зеркала с общей оптической осью, фиксирующей в пространстве направление лазерного луча (ось *OO* на рис. 2.31). Активный элемент находится между зеркалами. Спонтанные фотоны, случайно родившиеся в направлении *OO*, будут проходить внутри активного элемента относительно длинный путь, который, к тому же, многократно увеличивается вследствие отражений излучения от зеркал. Взаимодействуя с возбуждёнными активными центрами, эти фотоны инициируют, в конечном счёте, мощную лавину вынужденно испущенных фотонов — лазерный луч. Что же касается тех спонтанных фотонов, которые родились в иных направлениях, то они пройдут внутри активного элемента сравнительно короткий путь и «выйдут из игры».

Таким образом, зеркала оптического резонатора выделяют в пространстве определённое направление, вдоль которого реализуются наиболее благоприятные условия для развития фотонных лавин. Это и есть направление лазерного луча; он выходит из резонатора через одно из зеркал. Подчеркнём: фотонные лавины зарождаются от спонтанных фотонов и развиваются в определённом направлении вследствие преобладания вынужденного испускания над поглощением. Оптический резонатор играет принципиально важную роль: упорядочивает бурно развивающиеся в активном элементе процессы вынужденного испускания, направляет их в «нужное русло», и в итоге *формирует лазерное излучение*.

Почему деление тяжёлых атомных ядер может служить источником энергии? Атомное ядро состоит из *нуклонов* — нейтронов и протонов. Между протонами действуют силы электростатического отталкивания. Они разорвали бы ядро на части, если бы им не противостояли мощные ядерные силы, прочно связывающие нуклоны в ядре. Ядерные силы действуют между протонами, между нейтронами, между протонами и нейтронами. В отличие от электростатических сил ядерные силы являются короткодействующими; радиус их действия порядка 10^{-15} *м*.



Обозначим через *A* полное число нуклонов в ядре; его называют *массовым числом*. Число протонов равно атомному номеру *Z*; значит, число нейтронов есть $A - Z$. Чтобы

разделить данное ядро на все составляющие его нуклоны, надо затратить некоторую энергию $E_{св}$, называемую *энергией связи*. Часто рассматривают среднюю энергию связи на один нуклон, равную $E_{св} / A$; будем обозначать её через ε. На рисунке 2.33 изображена зависимость ε. от массового числа A. Из рисунка видно, что вначале энергия связи на нуклон довольно быстро растёт, достигает максимального значений (около 9 МэВ) примерно при $A = 50$, а затем, при дальнейшем увеличении A, начинает относительно плавно снижаться (до 7,5 МэВ для урана). Тонкая линия на рисунке в области лёгких ядер отражает «всплески» энергии связи для особо прочных ядер — $^{4}\mathrm{He}$ (эти ядра, напомним, называют α-частицами), $^{12}\mathrm{C}$, $^{16}\mathrm{O}$.

Общий характер зависимости $\varepsilon(A)$ объясняется «противоборством» ядерных сил притяжения и электростатических сил отталкивания. Благодаря своему дальнодействию последние влияют на ход кривой тем сильнее, чем больше A (точнее, чем больше Z; они пропорциональны Z^2); в результате прочность ядер при больших A постепенно снижается.

Зная ε для данного ядра, можно вычислить массу ядра M. Обращаем внимание на то, что масса ядра вовсе не равна сумме масс составляющих это ядро нуклонов; она всегда меньше на некоторую величину ΔM. Умножив ΔM на c^2 (c — скорость света), мы как раз получим полную энергию связи ядра εA. Установленная теорией относительности взаимосвязь массы и энергии играет здесь принципиально важную роль. Итак,

$$M = [Zm_p + (A-Z)m_n] - \Delta M = [Zm_p + (A-Z)m_n] - \frac{\varepsilon A}{c^2}, \qquad (1)$$

где m_p и m_n — соответственно массы протона и нейтрона (если m — масса электрона, то $m_p = 1836m$, $m_n = 1839m$). Приняв, для простоты что эти массы равны ($m_p = m_n = m'$), перепишем (1):

$$M = Am' - \frac{A\varepsilon}{c^2}, \qquad (2)$$

Предположим теперь, что некоторое тяжёлое ядро (его характеристики: M, A, ε_1) разделилось на два одинаковых ядра (характеристики конечного ядра: M', $\frac{A}{2}$, ε_2); эти ядра отмечены на рисунке 2.33 кружочками. Из рисунка видно, что $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$; в результате деления тяжёлого ядра образуются два ядра, каждое из которых более прочно, чем исходное ядро.

Используя (2), запишем для исходного ядра: $M = Am' - \frac{A\varepsilon_1}{c^2}$ и для двух конечных ядер: $2M' = Am' - \frac{A\varepsilon_2}{c^2}$. Вычитая второе равенство из первого, находим

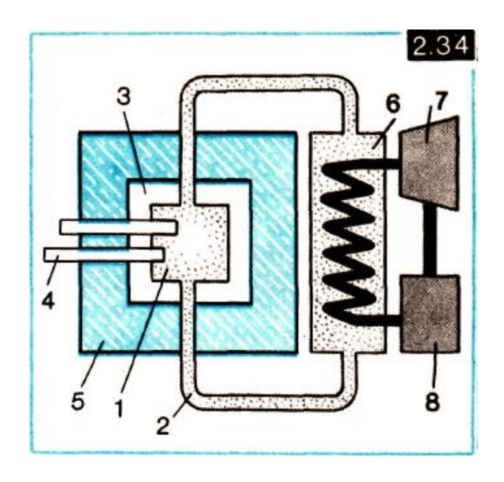
$$M - 2M' = A\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{c^2}, \qquad (3)$$

Так как $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, то, следовательно, $M > 2M'$. Итак, деление тяжёлого ядра сопровождается «потерей» массы: суммарная масса $2M'$ конечных ядер оказывается меньше массы M исходного ядра. В действительности масса не потерялась — она превратилась в энергию, равную, согласно (3), $A(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$. Вот почему деление тяжёлых ядер может служить источником энергии.

Теперь мы можем сделать заключение общего характера: всякий процесс, приводя-

щий к перемещению по кривой $\varepsilon(A)$ от меньших ε к большим (в направлении к более прочным ядрам), сопровождается выделением энергии. Собственно говоря, таких процессов может быть два: уже обсуждавшийся процесс *деления тяжёлых ядер* (происходит перемещение вверх по нисходящему участку кривой $\varepsilon(A)$ и процесс *слияния очень лёгких ядер*, называемый *термоядерным синтезом* (происходит перемещение вверх по восходящему участку кривой).

Физика атомного реактора. Ядерным топливом в большинстве существующих атомных реакторов служит ^{235}U (в природе этого изотопа урана в 140 раз меньше, чем изотопа ^{238}U). Ядро урана делится при попадании в него нейтрона. Процесс деления ядер ^{235}U наиболее эффективен (наиболее вероятен) для достаточно медленных — тепловых — нейтронов, имеющих энергию примерно 0,1 эВ. Существенно, что при делении ядра урана образуются два-три новых нейтрона, благодаря чему можно реализовать самоподдерживающуюся, цепную реакцию. Рождающиеся при делении урана новые нейтроны имеют энергию около 2 МэВ, поэтому для последующего эффективного их использования необходим замедлитель. Сталкиваясь с ядрами замедлителя, нейтроны относительно быстро растрачивают свою энергию, превращаются в тепловые нейтроны и поглощаются новыми ядрами ^{235}U, вызывая их деление. В процессе замедления часть нейтронов «выбывает из игры» — они вылетают из активной зоны реактора или поглощаются различными материалами (замедлителем, теплоносителем, конструкционными материалами и т. п.). Для обеспечения непрерывной работы реактора важно, чтобы вероятность нейтронам «выбыть из игры» оказалась согласованной с числом рождающихся нейтронов; недаром расчёт атомного; реактора достаточно трудоёмок, предполагает учёт многих факторов.



На рисунке 2.34 представлена схема атомного энергетического реактора. Здесь: *1* — активная зона — замедлитель нейтронов (графит), в который вставляются тепловыделяющие элементы (урановые стержни); *2* — теплоноситель, например вода (вода играет также роль замедлителя нейтронов); *3* — отражатель, предназначенный для уменьшения утечки нейтронов из активной зоны; *4* — регулирующие стержни из вещества, сильно поглощающего нейтроны; (кадмий, бор); *5* — защита атомного реактора; *6* — теплообменник (парогенератор); *7* — турбина; *8* — конденсатор для отработанного пара. В результате деления ядер урана в активной зоне выделяется энергия; она идёт на нагревание теплоносителя и вместе с ним отводится из активной зоны. Затем в теплообменнике энергия, отведённая из активной зоны, преобразуется в энергию водяного пара, заставляющего вращаться турбину. Прошедший через турбину пар конденсируется в воду, поступающую снова в теплообменник. Работа реактора регулируется специальными стержнями из кадмия или бористой стали: постепенно выдвигая эти стержни из активной зоны, увеличивают количество нейтронов в зоне и тем самым улучшают условия для самоподдерживающейся реакции. Напротив, вдвигая стержни в зону, уменьшают количество нейтронов в зоне (вследствие их поглощения в материале стержней), что может привести к прекращению самоподдерживающейся реакции и остановке реактора.

Проблема управляемого термоядерного синтеза. Огромная энергия освобождается при соединении друг с другом легчайших атомных ядер — водорода, дейтерия (тяжёлого водорода), трития (сверхтяжёлого водорода). Ядро дейтерия (D) состоит из протона и нейтрона, а трития (T) из протона и двух нейтронов. При слиянии ядер дейтерия и трития образуются очень прочное ядро гелия (α-частица) и свободный нейтрон: $\mathrm{D}+\mathrm{T}\to {}^{4}\mathrm{He}+n$; при этом высвобождается энергия 17,6 МэВ (на каждую пару ядер D и T). Помноженное на огромное число взаимодействующих водородных ядер, это количество энергии и даёт ту фантастическую энергию, которая выделяется при взрыве водородной бомбы.

Чтобы реализовать слияние лёгких ядер, необходимо нагреть водородную смесь до температуры свыше $10^{7}K$ — иначе ядра не смогут преодолеть электростатическое отталкивание и сблизиться до расстояний, на которых начинают действовать ядерные силы. По этой причине подобные реакции называют *термоядерными*. В водородной бомбе такие огромные температуры создаются в результате взрыва атомной (урановой) бомбы, играющей в данном случае роль взрывателя. При этом происходят неуправляемые процессы, приводящие к катастрофическим разрушениям. А нельзя ли сделать термоядерный синтез *управляемым*?

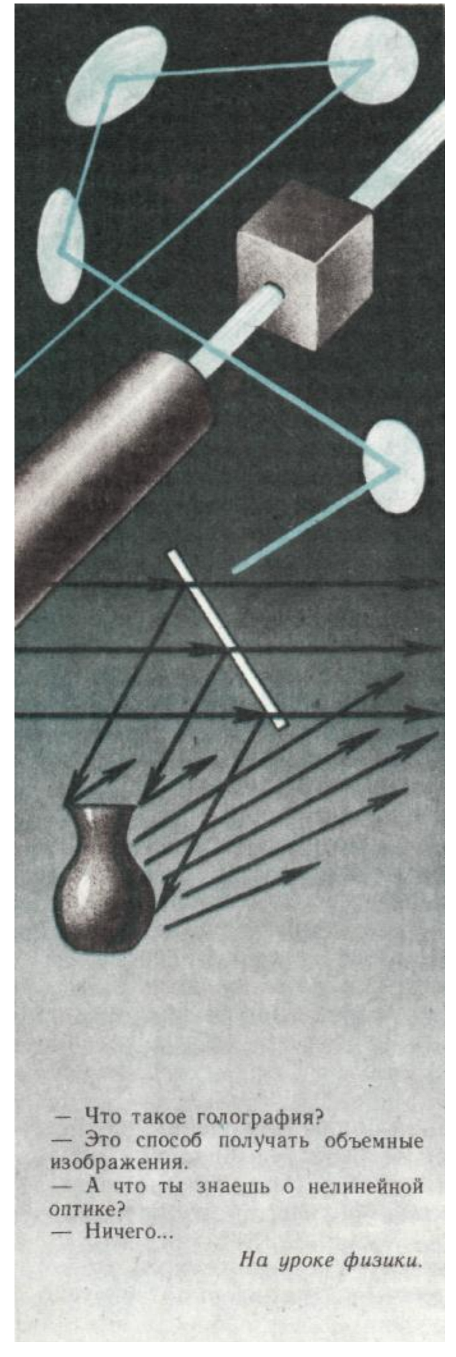
Над данной проблемой учёные упорно работают вот уже несколько десятков лет. Решение проблемы управляемого термоядерного синтеза имеет исключительно важное значение для человечества, так как это есть решение энергетической проблемы (и притом экологически оптимальное). Сегодня общество удовлетворяет свои потребности в энергии, главным образом, сжигая уголь, торф, газ, нефть; отчасти (примерно на 10%) эти потребности удовлетворяются за счёт энергии гидроэлектростанций и атомных электростанций. Но природные запасы нефти и газа, а затем и угля быстро истощаются. Подсчитано, что человечеству нефти и газа хватит всего на 30 – 50 лет, а угля — на 100 – 200 лет. Кроме того, сжигать уголь, торф, а особенно нефть и газ, во-первых, нерационально (сжигается ценное сырьё для получения многих химических продуктов, для производства белка, органических удобрений), а во-вторых, экологически вредно (в атмосферу выбрасывается большое количество углекислого газа, соединений серы и азота). Вот почему так важно овладеть новым и притом практически неисчерпаемым, экологически приемлемым, надёжным источником энергии — термоядерным синтезом. Заметим, что дейтерий в изобилии содержится в водах Мирового океана, а тритий может воспроизводиться на самих термоядерных станциях из лития ($n+{}^{6}\mathrm{Li}\to\mathrm{T}+{}^{4}\mathrm{He}$).

Исследования по управляемому термоядерному синтезу, ведущиеся в СССР и за рубежом более 30 лет, позволили решить ряд принципиальных задач: нагрев плазмы до сверхвысоких температур, удержание горячей плазмы внутри вакуумной камеры при помощи магнитного поля и др. В СССР в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова создана установка «Токамак», в которой за счёт протекающих в плазме электрических токов удалось получить температуру $1{,}5\cdot10^{7}K$. Ожидается, что на базе подобных установок удастся создать примерно через 10 – 15 лет первые *термоядерные электростанции*.

Параллельно ведутся исследования по осуществлению управляемого термоядерного синтеза за счёт нагрева термоядерной мишени мощными лазерными импульсами (*лазерный* термоядерный синтез). В СССР эти исследования возглавляет Физический институт имени П. Н. Лебедева АН СССР.

Подробнее с проблемой управляемого термоядерного синтеза, основными принципами и направлениями термоядерной энергетики можно познакомиться, например, по книге [90]. Об исследованиях по лазерному термоядерному синтезу можно прочитать в [66, 121].

Диалог. О новой оптике, рождённой лазером



Учитель. Я не вполне согласен с данной академиком Кедровым характеристикой особенностей НТР (она приводилась в § 9). Он говорил и притом довольно категорично, что в НТР развитие науки опережает развитие техники. По-моему, он противоречит сам себе — ведь перед этим он же сам отмечал, что обе революции (в науке и в технике) взаимно влияют друг на друга. Это действительно так; поэтому тезис о приоритете науки не должен быть категоричным. Конечно, развитие науки предопределило многие технические открытия (об этом обстоятельно говорилось выше), но, в свою *оче*редь, успехи техники дали импульс новым научным исследованиям. Во-первых, они расширили возможности научного поиска. Достаточно вспомнить, что изобретение электронного микроскопа способствовало развитию биологических исследований, а создание ускорителей заряженных частиц — развитию физики элементарных частиц. Во-вторых, успехи техники неизбежно порождают новые проблемы, требующие новых научных решений. Так, насколько мне известно, есть проблема создания высокоэффективных, мощных и надёжных лазеров — это требует, очевидно, серьёзных научных изысканий. Так что, хотя наука и определяет сегодня во многом технический прогресс, однако, есть и обратное воздействие: технический прогресс, в свою очередь, в немалой степени способствует развитию науки.

Автор. Вы очень диалектично поставили вопрос. Я разделяю Вашу точку зрения: нельзя категорично говорить о приоритете науки перед техникой. Конечно, наука в наше время играет существенно более важную роль, нежели в прошлом веке. И не просто важную, но, можно сказать, определяющую роль. Всё это так — и в то же время не совсем так.

Учитель. Как говорится, так да не так.

Автор. Есть очень яркий и к тому же очень полезный для школьной физики пример. Развитие современной физики привело к изобретению лазера. В свою очередь, лазер вдохнул новую жизнь в оптику, дав в руки исследователей световой луч с упорядоченной структурой (*когерентный* луч).

Учитель. Что Вы имеете в виду, говоря о луче с упорядоченной структурой?

Автор. Излучение, похожее на монохроматическую волну с чётким волновым фронтом. Излучение обычных (нелазерных) источников света выглядит по сравнению с лазерным излучением как «световой шум» — оно не имеет ни достаточной монохроматичности, ни направленности. Его называют некогерентным излучением.

С появлением когерентного лазерного излучения началось интенсивное развитие таких новых ветвей оптики, как *голография* и *нелинейная оптика*. Именно их я и подразумевал, говоря о том, что лазер вдохнул в оптику новую жизнь.

Учитель. Вы заметили, что Ваш пример очень полезен для школьной физики. Но в ней о голографии лишь упоминается (как о методе получения объёмных изображений). Что же касается нелинейной оптики, то она даже не упоминается.

Автор. Об этом можно только пожалеть. Голография — прекрасный и притом *действительно современный пример, иллюстрирующий как интерференцию, так и дифракцию света*. На этапе записи голограммы происходит интерференция опорной лазерной волны с объектной волной (волной, отражённой от объекта). Результат интерференции закрепляется на голограмме. На этапе считывания голограмма освещается опорной волной, которая испытывает дифракцию на сложном интерференционном рисунке голограммы. Я не объясняю сейчас физику и технику записи и считывания голограммы; полагаю, что необходимые сведения о голографии Вам известны. В крайнем случае об этом можно прочесть в популярных книгах, например [92, 116, 121, 139].

Учитель. Действительно, голография даёт возможность обсудить интерференцию и дифракцию света. Я буду использовать это в своей практике. Но голография интересна не только этим. Она позволяет получать удивительные *объёмные изображения.* На всех, кто видит их впервые, они производят очень сильное впечатление.

Автор. Говоря о пользе рассмотрения голографии в школе, я предполагал четыре момента. Во-первых, голография как пример на тему об *интерференции и дифракции света* (о чём уже говорилось). Во-вторых, голография как *новый способ записи и воспроизведения изображений* (то, о чём Вы сейчас сказали). Причём дело не только в получении эффектных объёмных изображений. Очень важно, что информация о каждом участке поверхности объекта «записана» по всей площади голограммы; поэтому не страшно испортить или просто удалить часть площади голограммы — всё равно будет восстановлено полное изображение объекта.

Учитель. Это говорит о высокой надёжности хранения информации на голограмме.

Автор. Конечно. Кроме того, на одной голограмме можно хранить очень большой объём информации. Скажем, на голограмме размерами 10 × 10 см можно, в принципе, записать, а затем постранично считать целый том Большой Советской Энциклопедии. Это говорит об исключительно высокой информационной ёмкости голограммы. Возможно, в будущем человечество будет предпочитать хранить информацию именно в виде голограмм. Не только голограмм книг и чертежей, но также голограмм объёмных фигур, уникальных скульптур и т. п.

Учитель. Думаю, что в будущем голограммы будут широко использоваться в учебном процессе в школе.

Автор. По-видимому, так и будет. Существуют толстослойные, или объёмные, голограммы (толщина слоя фотоэмульсии около 20 мкм). Записываются они, как и обычные голограммы, в лазерном свете, однако для считывания их лазер уже не нужен — их можно прекрасно разглядывать в солнечном свете, в световом луче из проекционного аппарата и даже в свете от обычной лампы накаливания. Такие голограммы могут использоваться в школьных учебниках — как объёмные иллюстрации или, что особенно интересно, как трёхмерные графики, объёмные геометрические построения. Благодаря голограммам школьники в любом пункте страны смогут «воочию» познакомиться с мировыми шедеврами скульптуры и архитектуры, с уникальными археологическими находками и т. п.

Учитель. А голографическое кино?

Автор. Да, и кино тоже. Кстати, первый короткометражный голографический кинофильм с успехом демонстрировался ещё в 1976 г.

Но пойдём дальше. Говоря о пользе изучения голографии, мы отметили пока два момента (во-первых и во-вторых). А теперь — в-третьих. *Голография представляет собой важный шаг в овладении такой формой материи, как поле*. С *веществом* человек начал работать давно. Сегодня он владеет многими способами обработки и хранения вещества. Иное дело — *поле*. Здесь сделаны пока только первые шаги. Голография — один из таких шагов, и именно в этом, на мой взгляд, её принципиальное значение для нас. Когда мы

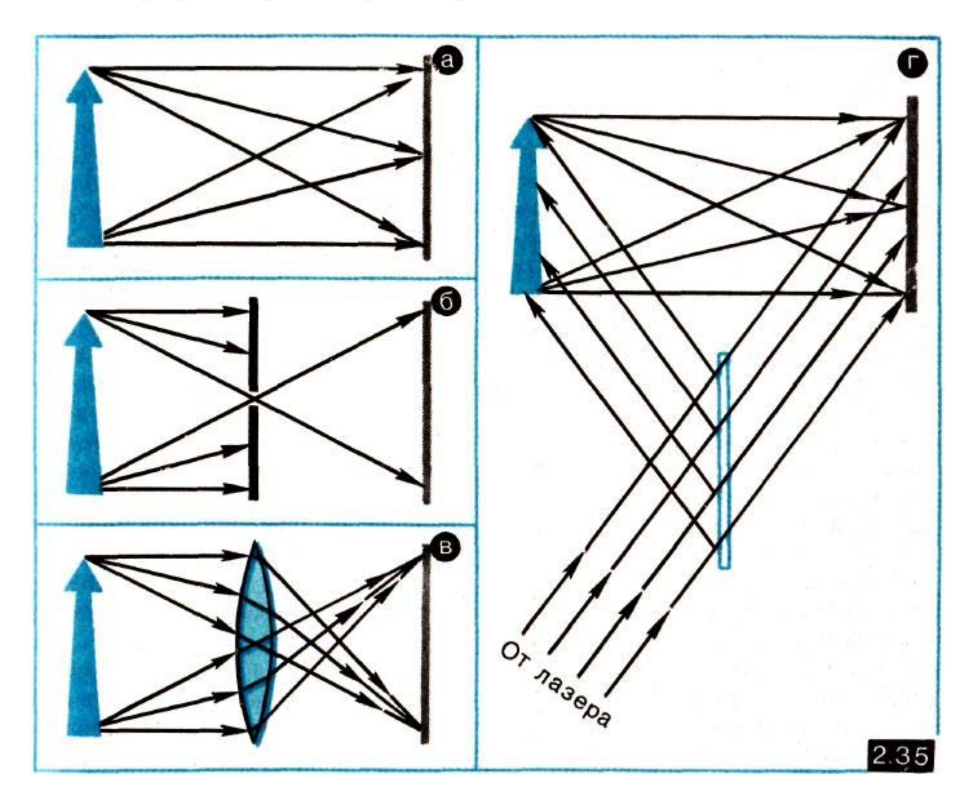
считываем голограмму, мы восстанавливаем *реальное* световое поле, настолько же реальное, как световое поле, отражаемое самим объектом. Создавая при помощи ЭВМ специальные голограммы (ведь интерференционный рисунок на голограмме может быть синтезирован искусственно), можно видоизменять, т. е. *обрабатывать*, световое поле.

Учитель. Голография как метод обработки светового поля?

Автор. Как метод, позволяющий не только обрабатывать, но и консервировать (хранить), а затем воспроизводить световое поле.

Наконец, в-четвёртых, голография может рассматриваться как пример, иллюстрирующий известную *философскую спираль* (диалектический закон «отрицания отрицания»).

Учитель. Голография и философия? Признаться, довольно неожиданный поворот.



Автор. Представим поэтапно развитие методов получения изображений. *Первый* (начальный) этап (рис. 2.35, *а*): помещаем освещённый объект просто перед экраном. Световые лучи, отражённые объектом, попадают на экран, но изображения они не сформируют — ведь лучи «перепутаны»: от каждой точки поверхности объекта лучи попадают на всю площадь экрана. Их требуется как-то упорядочить. *Второй* этап (рис. 2.35, *б*): упорядочение хода лучей осуществляется весьма просто — между объектом и экраном помещают перегородку с небольшим отверстием (так формируется изображение в камере-обскуре). Изображение получается чёткое, но, к сожалению, здесь используется очень малая доля света, отражённого объектом. *Третий* этап (рис. 2.35, *в*): упорядочение хода лучей осуществляется с помощью линзы или системы линз, помещаемой между объектом и экраном. По сравнению с предыдущим методом здесь для формирования изображения используется значительно больше света от объекта. *Четвёртый* этап (рис. 2.35, *г*) — голографический этап. Как и на первом из рассмотренных этапов, здесь не предпринимаются меры по упорядочению хода лучей — нет ни перегородки с отверстием, ни линз; как и раньше, лучи от каждой точки объекта попадают на всю площадь экрана. Правда, теперь используются лучи от лазера, экран (точнее, фотоэкран) имеет высокое пространственное разрешение: не менее 1000 линий на мм, а к «перемешанным» лучам от объекта добавлены упорядоченные лучи опорного пучка. Именно это и позволяет впоследствии (при считывании голограммы) обеспечить автоматическое «распутывание» объектных лучей. Итак, мы как

бы вернулись к исходному этапу, но на качественно ином уровне — налицо виток философской спирали.

Учитель. Да, тема «Голография» является в самом деле глубокой. Её изучение в школе, без сомнения, было бы полезным во многих отношениях. Думаю, что при разработке действительно современного школьного курса физики она будет по достоинству оценена.

Автор. Это же, по-видимому, надо сказать и о теме «Нелинейная оптика». Здесь также поднимаются принципиальные вопросы. Как Вы полагаете, изменяются ли характеристики вещества *под действием светового пучка*, который распространяется в этом веществе?

Учитель. Показатель преломления среды не зависит он интенсивности света. То же можно сказать и о других характеристиках среды.

Автор. Так было до лазеров. С их появлением ситуация изменилась. Напряжённость поля световой волны от лазера может стать *сопоставимой* с напряжённостью полей в атомах и молекулах вещества; в этом случае при прохождении такой световой волны через вещество его характеристики изменяются. Изменение имеет *обратимый* характер: как только прекращается облучение вещества лазерным излучением, характеристики вещества становятся прежними — такими, какими они были до облучения. Примером может служить *изменение прозрачности среды* под воздействием лазерного луча. Это поистине удивительная картина: мощный лазерный импульс, падая на непрозрачную пластинку, почти моментально *просветляет* её и проскакивает насквозь, после чего пластинка тут же становится непрозрачной. Не менее удивительно и явление *затемнения среды*. Здесь всё происходит наоборот: пластинка, бывшая вначале прозрачной, мутнеет при облучении её светом. Оба отмеченных явления относятся к *нелинейно-оптическим явлениям*.

Учитель. Как объяснить учащимся физику этих явлений?

Автор. Это очень легко сделать, если учащиеся знакомы с азами квантовой физики. Начнём с *явления просветления среды*. Пусть среда поглощает свет на частоте ν; при этом атомы (поглощающие центры) переходят с уровня E_1 на уровень E_2 ($E_2 - E_1 = h\nu$). Мощное лазерное излучение частоты ν может вызнать активную «переброску» атомов с уровня E_1 на уровень E_2. Как только число атомов на обоих уровнях станет одинаковым, среда полностью просветлится — утратит способность поглощать световое излучение (теперь число переходов $E_1 \to E_2$ в единицу времени становится равным числу переходов $E_2 \to E_1$, так что сколько фотонов $h\nu$ поглощается из пучка света, столько же добавляется в него за счёт вынужденного испускания). После прекращения облучения среды светом атомы вскоре «соскакивают» спонтанно с уровня E_2 обратно на уровень E_1 — среда снова приобретает способность поглощать излучение на частоте ν (становится непрозрачной).

Явление затемнения среды объясняется столь же просто. Предположим, что расстояние между уровнями атома равно $2h\nu$ (или представим, что такова ширина запрещённой зоны в полупроводнике). Такие атомы (такой полупроводник) не могут поглощать фотоны $h\nu$ — среда прозрачна для излучения на частоте ν. Но при достаточно высокой интенсивности излучения становится возможным поглощение сразу двух фотонов; их суммарная энергия как раз равна расстоянию между уровнями атома (или ширине запрещённой зоны в полупроводнике), в результате прозрачность среды уменьшается. Чем больше интенсивность света, тем *вероятнее двухфотонное поглощение* и, следовательно, тем в большей степени затемняется среда.

Учитель. Значит, при большой интенсивности света должна исчезать красная граница фотоэффекта? Ведь в этом случае, наряду с уравнением Эйнштейна для фотоэффекта (уравнение (1) в § 7), предусматривающим поглощение фотоэлектроном одного фотона, надо использовать уравнение $E_k = 2h\nu - A$, предусматривающее поглощение фотоэлектроном сразу двух фотонов.

Автор. Так и есть в действительности. При достаточно большой интенсивности света

возможно поглощение фотоэлектроном сразу не только двух, но и трёх и даже более фотонов. Это есть *многофотонный фотоэффект*. Он также относится к нелинейно-оптическим явлениям.

Учитель. А как объясняется термин «нелинейная оптика»?

Автор. Не входя в детали математического аппарата нелинейной оптики, поясним этот термин следующим образом. Когда световая волна проходит через среду, электрическое поле волны смещает электронные облака атомов относительно атомных ядер — среда *поляризуется*. Эту поляризацию можно рассматривать как «отклик» среды на внешнее воздействие — световую волну. Обычно указанный отклик *прямо пропорционален* воздействию, зависит от него линейно (обычная оптика — это «линейная оптика»). В случае же мощного лазерного излучения отклик среды (её поляризация) становится *нелинейным* — квадратичным или кубичным — по отношению к внешнему воздействию (напряжённости поля волны). Вот эта нелинейность поляризации среды и обусловливает, в конечном счёте, различные нелинейно-оптические явления. Отсюда и термин «нелинейная оптика». При линейной связи между поляризацией среды и напряжённостью светового поля распространяющиеся в среде световые волны друг с другом не взаимодействуют. Нелинейность упомянутой связи приводит к *взаимодействию волн*. В результате этого взаимодействия могут возникать световые волны с удвоенной, утроенной частотой, с суммарной и разностной частотами.

Учитель. Насколько я помню, спектральная неизменность монохроматического света — аксиома ньютоновской оптики.

Автор. Верно. Недаром французский поэт Дюлар писал в 1758 г.:

Но что же? Сих лучей тончайшее строенье
Не в силах изменить людское ухищренье!
Вотще старания! Луч красный иль иной,
Усилья одолев, цвет сохраняет свой.

Так действительно было до возникновения нелинейной оптики. Теперь же появилась возможность удваивать и утраивать частоту света, складывать и вычитать частоты и, более того, плавно перестраивать частоту света. Пропуская лазерное излучение частоты ν через спектральный прибор, называемый *параметрическим генератором света*, можно по желанию плавно изменять частоту излучения от значения ν до некоторого меньшего значения ν_1. Удвоение частоты *(генерация второй оптическом гармоники)*, утроение частоты *(генерация третьей гармоники)* плавная перестройка частоты *(параметрическая генерация света)* — все эти нелинейно-оптические явления находят сегодня практическое применение.

Учитель. Если эти явления перевести на язык фотонов, то получается, что при генерация второй гармоники происходит слияние двух фотонов $h\nu$ в один фотон $2h\nu$, а при генерации третьей гармоники — слияние трёх фотонов в один.

Автор. А при параметрической генерации света происходит расщепление исходного фотона на два новых фотона. Здесь проявляется характерная черта нелинейно-оптических явлений — им отвечают многофотонные элементарные процессы.

Учитель. Объёмное голографическое изображение похоже на чудо. Но в нелинейной оптике «чудес», пожалуй, поболее: изменение частоты света, просветление и затемнение среды.

Автор. Здесь есть и такое удивительное явление, как самофокусировка света: световой пучок в среде не расширяется, а, напротив, фокусируется в тонкую световую нить. Список «чудес» нелинейной оптики достаточно обширен. При желании можно более подробно познакомиться с ними, прочитав, например, [44, 93, 121].

Учитель. Фактически речь идёт о качественно новой оптике.

Автор. Совершенно согласен с Вами. И голографию, и нелинейную оптику можно было бы назвать «оптикой, рождённой лазером». Хотя идеи обоих оптических направле-

ний зародились до появления лазера, однако именно лазер обеспечил развитие этих направлений.

Учитель. Вот и получается, что сегодня не только наука определяет развитие техники, но и техника определяет дальнейшее развитие науки.

Автор. *Сначала* квантовая электроника, физика твёрдого тела, физика плазмы сделали возможным создание лазера. *Затем* лазер дал импульс развитию голографии и нелинейной оптики. Но точку ставить рано. Успехи голографии и нелинейной оптики, *в свою очередь*, позволяют совершенствовать и развивать далее лазерную технику (но об этом мы сейчас говорить не будем). Как видим, *взаимовлияние науки и техники в наше время, по сути дела, неисчерпаемо*.

§ 10. В ГЛУБЬ МАТЕРИИ: ОТ АТОМА — К КВАРКАМ

Атомное ядро до 1932 г. На основании опытов по рассеянию α-частиц Резерфорд в 1911 г. пришёл к выводу, что в центре атома есть положительно заряженное малое ядро, заключающее в себе почти всю массу атома (слово «ядро» происходит от греческого «хадрос», что означает «массивный, тяжёлый»). Было ясно, что в состав ядра входят протоны, и что число протонов в ядре равно числу электронов, движущихся около ядра, — ведь атом электрически нейтрален. Однако измерения масс атомов дали довольно неожиданные результаты. Оказалось, например, что у атома гелия, имеющего два электрона, масса не в два, а в четыре раза больше массы атома водорода; получалось, что в ядре гелия не два, а четыре протона. Чтобы спасти нейтральность атома, оставалось предположить, что наряду с четырьмя протонами в ядре гелия содержатся два электрона (два электрона около ядра и два электрона внутри ядра). Атом кислорода имеет 8 электронов, а его масса оказалась в 16 раз больше массы атома водорода; пришлось допустить, что ядро кислорода состоит из 16 протонов и 8 электронов. Наличие электронов внутри ядра, как полагали тогда, подтверждалось явлением β-радиоактивности атомных ядер.

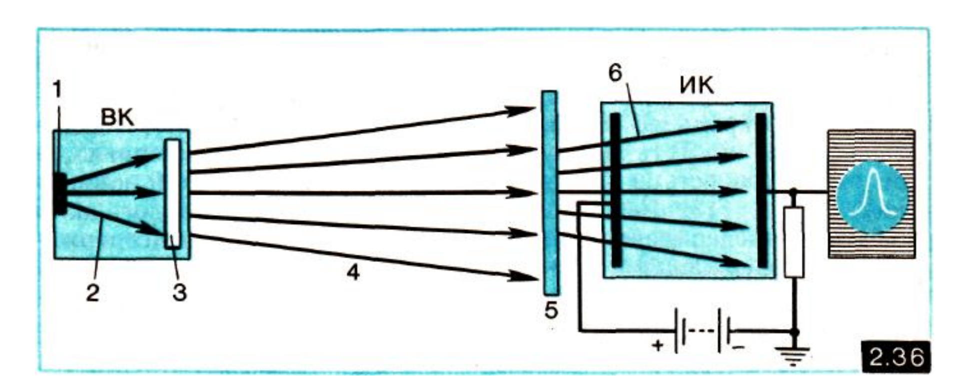
В 1920 г. Резерфорд высказал мысль, что ядро состоит из протонов и нейтронов. Правда, под нейтроном он понимал не элементарную частицу, а нейтральный дублет — компактное образование из протона и электрона. По Резерфорду, ядро гелия состояло из двух протонов и двух нейтральных дублетов, а ядро кислорода — из восьми протонов и восьми дублетов.

Во второй половине 20-х годов благодаря развитию квантовой теории стало ясно, что электрон никак не может быть локализован в атомном ядре (см. § 7). Он не может там находиться ни в «чистом виде», ни, тем более, внутри дублета. Это означало, что наблюдаемые при β-распаде ядер электроны рождаются в процессе β-распада подобно тому, как рождаются фотоны при испускании света атомами. «Изгнание» электрона из атомного ядра, естественно, обострило проблему строения ядра. Возникла мысль, что резерфордовские «нейтроны» — это нейтральные элементарные частицы с массой, близкой к массе протона. Однако пока это было только предположение, нейтрон предстояло ещё открыть.

Открытие нейтрона. История открытия нейтрона очень поучительна, поэтому расскажем о ней достаточно подробно. В 1930 г. немецкие физики В. Боте и Г. Беккер обнаружили, что бериллий при обстреле α-частицами испускает излучение, не оставляющее треков в камере Вильсона; через толстые свинцовые плиты толщиной 10 см это излучение проходило, почти не ослабевая. Было высказано предположение, что оно представляет собой жёсткое γ-излучение — электромагнитное излучение, кванты которого обладают большой энергией. Загадочным излучением Боте — Беккера заинтересовались французские физики Ирен и Фредерик Жолио-Кюри. Они получили интересный результат: парафиновая заслонка, в отличие от свинцовой, надёжно перекрывала это излучение, при этом из парафина летело по направлению излучения большое число быстрых протонов.

И. и Ф. Жолио-Кюри предположили, что протоны — это ядра отдачи, возникающие в результате столкновения высокоэнергетичных квантов с атомами водорода, находящимися в парафине. Зная энергию протона отдачи, можно оценить энергию кванта, «выбившего» этот протон. И. и Ф. Жолио-Кюри определили энергию протонов по максимальным расстояниям, проходимым ими в воздухе, и на основании законов сохранения импульса и энергии оценили энергию квантов; она оказалась весьма большой: примерно $5 \cdot 10^7$ эВ. Откуда берётся столь большая энергия квантов? Почему, передавая свою энергию протонам, они в то же время «не желают» взаимодействовать с ядрами свинца? Ответов на эти вопросы не было. И тем не менее в своей работе, опубликованной 18 января 1932 г., супруги Жолио-Кюри сделали вывод, что излучение Боте — Беккера есть жёсткое электромагнитное излучение.

Познакомившись с этой работой, английский физик Д. Чедвик (1891 – 1974) из лаборатории Резерфорда в Кембридже догадался, по-видимому, что немецкие и французские физики имели дело не с жёстким электромагнитным излучением, а с *нейтронами*. Чедвик был учеником Резерфорда; под влиянием учителя он давно проникся идеей «нейтрона», искал нейтроны, был уверен в их существовании. Впоследствии он признавался: «Мои мысли, естественно, вертелись вокруг нейтронов». Чедвик повторил опыты И. и Ф. Жолио-Кюри, внеся в них существенное дополнение с целью проверки нейтронной гипотезы: он применил разные заслонки, содержащие лёгкие элементы (водород, литий, углерод, азот и др.). Оказалось, что излучение, возникающее при бомбардировке бериллия α-частицами, порождает не только протоны, но и другие ядра отдачи — ядра лития, углерода, азота и т. д. Для измерения энергии ядер отдачи Чедвик воспользовался импульсной ионизационной камерой с усилителем и осциллографом. Ионизационная камера имеет два электрода, между которыми приложено напряжение $10^2 - 10^3$ *В*. Ядро отдачи, пролетая между электродами, производит ионизацию атомов газа, наполняющего камеру. Образующиеся ионы и электроны движутся под действием электрического поля к соответствующим электродам; в результате в цепи ионизационной камеры появляется импульс тока, который может быть усилен и подан на осциллограф. Схема экспериментальной установки Чедвика показана на рисунке 2.36. Здесь: *ВК* — вакуумная камера, *ИК* — ионизационная камера, *1* — полоний, являющийся источником α-частиц, *2* — α-частицы, *3* — бериллиевая мишень, *4* — исследуемое излучение (нейтроны), *5* — заслонка, из которой выбиваются ядра отдачи, *6* — ядра отдачи.



Измеряя наблюдаемый на осциллографе импульс, Чедвик определял энергию различных ядер отдачи. Сравнив затем эти энергии, он пришёл к выводу: излучение, возникающее при бомбардировке бериллия α-частицами, есть не что иное, как поток нейтральных частиц с массой, практически равной массе протона. И вот 27 февраля 1932 г. появляется сообщение Чедвика «Возможность существования нейтрона», где, в частности, говорилось: «Результаты, полученные мною, очень трудно объяснить, исходя из предположения об электромагнитном излучении, если при столкновении должны сохраняться энергия и количество движения. Однако трудности исчезают, если предположить, что излучение состоит из частиц с массой 1 и зарядом 0, то есть из нейтронов. Можно предположить, что в

результате захвата α-частицы ядром Be образуется ядро ^{12}C и испускается нейтрон... Столкновения этих нейтронов с атомами, через которые они проходят, создают атомы отдачи; наблюдаемая энергия атомов отдачи находится в полном соответствии с такой точкой зрения» [85, с. 144].

Конечно, исследования Боте, Беккера и супругов Жолио-Кюри сыграли важную роль в открытии нейтрона. Однако решающего шага эти физики всё же не сделали. Как образно сказал Б. М. Кедров, «они подошли вплотную к двери, ведущей к разгадке новой тайны природы, они ощупали эту дверь и даже постучались в неё, но открыть её не смогли, так как эта дверь открывается не «к себе» (то есть в сторону электромагнитной концепции), а «от себя» (то есть в сторону коренного отказа от этой концепции)» [85, с. 117]. Решающий шаг сделал Чедвик, он догадался проделать эксперимент с разными заслонками (водородсодержащей, азотсодержащей и др.) и предпринял измерения энергии ядер отдачи. Выполнив эти измерения и сопоставив полученные количественные результаты, Чедвик сделал правильный вывод о существовании нейтрона.

Открытие нейтрона и законы сохранения энергии и импульса. Прервём на время нить нашего рассказа, чтобы дать учителю физики совет методического характера. Открытие нейтрона — прекрасная тема *для повторения с учащимися законов сохранения энергии и импульса*. Ведь именно на этих основополагающих законах и основывались рассуждения и довольно простые расчёты Чедвика, позволившие ему, в конечном счете, сделать вывод о существовании нейтрона.

Пусть ядро *1* массы m (предполагаемый нейтрон), имеющее скорость v, испытывает лобовое упругое столкновение с покоящимся ядром *2* массы M. Ядро *1* отскакивает назад со скоростью v_1, а ядро *2* начинает двигаться вперёд со скоростью V. Законы сохранения энергии и импульса для соударяющихся ядер могут быть записаны, соответственно, как

$$\left.\begin{aligned} &\frac{mv^2}{2} = \frac{MV^2}{2} + \frac{mv_1^2}{2} \\ &mv = MV - mv_1 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

Введя обозначение $\mu = \dfrac{M}{m}$, перепишем (1) в виде

$$\left.\begin{aligned} &v^2 = \mu V^2 + v_1^2 \\ &v = \mu V - v_1 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Исключим из этих уравнений v_1. Из второго уравнения (2) следует

$$v_1 = \mu V - v \tag{3}$$

Возведём обе части равенства (3) в квадрат: $v_1^2 = \mu^2 V^2 - 2\mu V v + v^2$ и подставим v_1^2 в первое уравнение (2); получим: $v^2 = \mu V^2 + \mu^2 V^2 - 2\mu v V + v^2$. Отсюда $\mu(1+\mu)V^2 = 2\mu v V$. Так как $\mu V \neq 0$, делим обе части последнего равенства на μV, после чего находим:

$$V = v\frac{2}{1+\mu} = v\frac{2m}{m+M}. \tag{4}$$

Предположим далее, что в одном случае ядро-мишень имеет массу M_1 (обозначим его скорость после соударения через V_1), а в другом случае — массу M_1 (скорость после соударения V_2). Из (4) следует, что

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{m+M_2}{m+M_1}. \tag{5}$$

Для водородсодержащей, и азотсодержащей заслонок имеем, соответственно, $M_1 = m_p$ и $M_2 = 14m_p$, где m_p — масса протона. Измерив для этих заслонок энергии ядер отдачи, Чедвик нашел, что $\frac{V_1}{V_2} \approx 7$. Подставив это отношение в (5), он получил $\frac{m + 14m_p}{m + m_p} \approx 7$, откуда немедленно следует $m \approx m_p$.

С принятием нейтронной гипотезы становилось понятно, почему излучение Боте — Беккера легко проходило через свинцовую пластину и, наоборот, хорошо задерживалось парафиновой (водородсодержащей) заслонкой. Подставив (4) в (3), получим:

$$v_1 = v\frac{2\mu}{1+\mu} - v = v\frac{\mu - 1}{\mu + 1}.$$

Отсюда следует, что отношение энергии E налетающей частицы после соударения к её энергии E до соударения равно (для лобового соударения)

$$\eta = \frac{E_1}{E} = \left(\frac{v_1}{v}\right)^2 = \left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1}\right)^2 = \left(\frac{M - m}{M + m}\right)^2. \quad (6)$$

Легко видеть, что при $M \gg m$ (свинцовая заслонка) величина η близка к единице — энергия налетающей частицы (нейтрона) уменьшается в каждом соударении очень мало. Наоборот, если масса *M* близка к массе *m*, то отношение η мало — потери энергии нейтрона в каждом соударении относительно велики. При лобовом соударении с протоном нейтрон должен остановиться, передав всю свою энергию протону. Теперь понятно, почему нейтроны относительно легко проходят через свинец, но застревают в парафине, выбивая в направлении своего движения протоны.

«Год чудес». 1932 г. вошёл в историю физики как «год чудес». Первое «чудо» этого года — открытие нейтрона в реакции

$$^{4}\text{He} + {}^{9}\text{Be} \to {}^{12}\text{C} + n.$$

Оно имело поистине революционное значение, так как фактически означало крушение электромагнитной концепции в физике. До этого, как мы уже отмечали, физическая картина мира строилась на двух фундаментальных взаимодействиях — электромагнитном и гравитационном — и обходилась всего тремя «элементарными кирпичиками»: электроном, протоном и фотоном. С появлением нейтрона в физику не просто вошла ещё одна элементарная частица — появилось дополнительное фундаментальное взаимодействие; его стали называть *ядерным* или *сильным*. Сразу же после открытия нейтрона была предложена *протонно-нейтронная модель* атомного ядра: ядро состоит из протонов и нейтронов, между которыми на весьма малых расстояниях действуют мощные силы притяжения не электромагнитной природы — это и есть ядерное (сильное) взаимодействие. Протонно-нейтронная модель была свободна от всех неувязок и «натяжек» прежних моделей ядра, объясняла известные к тому времени данные о ядерных превращениях. Дальнейшие исследования подтвердили справедливость этой модели.

С нейтроном в физику вошло не только третье (*сильное*) фундаментальное взаимодействие, но и четвёртое взаимодействие — так называемое *слабое* взаимодействие. Оказалось, что, в отличие от электрона, протона, фотона, нейтрон *нестабилен* — он самопроизвольно (спонтанно) превращается в другие частицы:

$$n \to p + e^- + \tilde{v}_e.$$

Здесь *p* — протон, e^- — электрон, $\tilde{v}_e$ — электронное антинейтрино (эта частица была установлена позднее). Обычно применяют термин «распад нейтрона» (это не надо понимать как распад на составные части — протон, электрон и антинейтрино не содержались в ней-

троне, а родились в момент его «распада»). Распад нейтрона как раз и обусловлен слабым взаимодействием. Заметим, что нейтроны в стабильных атомных ядрах не распадаются. Нестабильны свободные нейтроны и нейтроны в нестабильные ядрах; явление β-распада ядер обусловлено распадом нейтронов этих ядер.

Но вернёмся к «году чудес». Вскоре после открытия нейтрона Н. Фезер (1904 – 1978) наблюдал первую ядерную реакцию под действием нейтронов:

$$n + {}^{14}\mathrm{N} \rightarrow {}^{11}\mathrm{B} + {}^{4}\mathrm{He}.$$

Работа Фезера была первой ласточкой. Вслед за ней последовало огромное число исследований по ядерным реакциям, вызванным нейтронами. Как отмечал Чедвик в своей лекции при получении Нобелевской премии за открытие нейтрона, большую эффективность нейтронов в получении ядерных реакций легко объяснить. При столкновении заряженной частицы с ядром вероятность её проникновения в ядро ограничена кулоновской силой отталкивания. В случае же соударения нейтрона с ядром ограничения такого типа не существует. Сила взаимодействия нейтрона с ядром вначале весьма мала; лишь на очень малых расстояниях она начинает быстро расти и носит характер притяжения. Поэтому даже нейтроны очень малой энергии могут проникнуть в ядро. Забегая вперед, отметим, что в 1934 г. Э. Ферми открыл искусственную радиоактивность атомных ядер под действием нейтронного облучения. В том же году Ферми наблюдал деление ядер тяжёлых элементов под действием медленных нейтронов. С открытием нейтрона началась эра *ядерной физики*, ознаменовавшаяся в середине столетия развитием физики элементарных частиц и рождением ядерной техники.

«Чудеса» 1932 г. связаны не только с открытием нейтрона. В августе этого года К. Андерсон (р. 1905), регистрируя на фотопластинках космические лучи, обнаружил след новой частицы, которая имела положительный заряд и массу, равную массе электрона. Это был предсказанный год назад П. Дираком (1902 – 1984) *позитрон* — античастица электрона. Так была открыта *первая античастица*. Позитрон образуется из имеющего большую энергию кванта электромагнитного излучения одновременно с электроном (образование электронно-позитронной пары):

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

(e^+ — позитрон). Учитывая взаимосвязь массы и энергии, заключаем, что энергия кванта должна быть выше $2m_e c^2$, где m_e — масса электрона (говоря о массе частицы, мы обычно имеем в виду массу покоя). Зная массу электрона, легко подсчитать, что энергия кванта должна быть больше 1 МэВ.

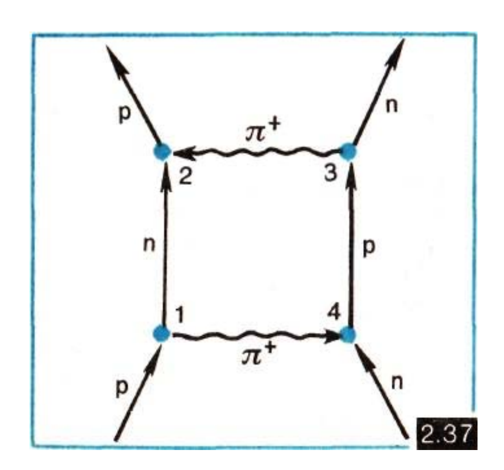
«Это было открытие величайшей важности, — писал Гейзенберг. — Ведь до того времени большей частью считалось, что имеются два вида фундаментальных частиц, электроны и протоны, отличающиеся тем, что они никогда не изменяются и что число их всегда постоянно... Экспериментальное доказательство образования пар — электронов и позитронов — показало ложность такого представления. Электроны могут возникать и снова исчезать; число их поэтому никоим образом не постоянно» [32, с. 163 – 164]. Здесь не упомянуто ещё об одном моменте: с открытием позитрона рушилась перегородка между веществом и полем. Оказывается, *поле может превращаться в вещество* (рождение электронно-позитронной пары), равно как *вещество может превращаться в поле* (обратный процесс — аннигиляция электрона и позитрона). Позднее мы ещё вернемся к этому принципиальному моменту.

Небольшой диалог, посвященный пиону. В 30-х годах был открыт мюон (обозначение μ^-, масса $207m_e$, время жизни $2\cdot 10^{-6} c$), поначалу ошибочно принятый за «переносчика» ядерного взаимодействия (подобно тому, как фотон является «переносчиком» элек-

тромагнитного взаимодействия). Действительный «переносчик» ядерного взаимодействия был открыт несколько лет спустя; это был пион (π^+, $273\,m_e$, $2{,}6\cdot 10^{-8}\,c$).

Учитель. Каким образом с помощью пионов осуществляется ядерное взаимодействие между протоном и нейтроном?

Автор. Это можно представить, воспользовавшись условной диаграммой на рисунке 2.37. Прямым линиям на диаграмме соответствуют протон или нейтрон, а волнистым — пион. В точках *1* и *3* происходит превращение $p \to n + \pi^+$, а в точках *2* и *4* — превращение $n + \pi^+ \to p$. Диаграмма наглядно представляет взаимодействие между протоном и нейтроном как обмен пионами.



Учитель. А как объяснить взаимодействие между двумя протонами или между двумя нейтронами?

Автор. Два протона (равно как и два нейтрона) взаимодействуют, обмениваясь нейтральным пионом (π^0, $264\,m_e$, $8\cdot 10^{-17}\,c$).

Учитель. Как известно, ядерные силы действуют лишь на очень малых расстояниях — не более 10^{-15} *м*. Можно ли объяснить короткодействие ядерных сил, исходя из характеристик пионов, являющихся «переносчиками» этих сил?

Автор. Можно. Квантовая теория оценивает радиус действия сил ρ по простой формуле $\rho \approx \dfrac{h}{2\pi mc}$, где m — масса покоя «переносчика» взаимодействия. Легко подсчитать, что при $m \approx 300\,m_e$ получается $\rho \approx 10^{-15}$ *м*.

Учитель. Электромагнитное взаимодействие хотя и убывает с расстоянием, однако проявляется как угодно далеко. По-видимому, это есть следствие равенства нулю массы покоя фотона?

Автор. Вы правы.

Учитель. Давайте вернёмся к диаграмме на рисунке 2.37. Как быть здесь с законом сохранения энергии? Ведь он явно не выполняется в точках 1, 2, 3, 4. Например, как может протон, имеющий массу $1836\,m_e$, превратиться в две частицы с суммарной массой $(1839+273)m_e = 2112\,m_e$?

Автор. Вы задали интересный вопрос. Обратите внимание: «нарушение» закона сохранения энергии здесь сугубо временное — в течение некоторого времени Δt между событиями 1 и 4. Согласно соотношению неопределённостей для энергии и времени, энергия системы имеет при этом неопределённость $\Delta E \gtrsim \dfrac{h}{\Delta t}$, поэтому нет смысла в данном случае следить за сохранением энергии.

Учитель. И всё же это похоже на то, как если бы в точке 1 энергия откуда-то была взята «взаймы», а в точке 4 «долг» был возвращён. Или скажем, в точке 2 энергия была

куда-то на время передана, а в точке 3 получена обратно.

Автор. Между прочим, квантовая теория допускает и такую интерпретацию рассматриваемых событий.

Учитель. Но кто же, собственно говоря, даёт (берёт) энергию «в долг», а затем получает (возвращает) этот «долг»?

Автор. Этот «кто-то» есть физический вакуум.

Учитель. Вакуум — это пустота, ничто. Как он может «участвовать» в обмене энергией с частицами?

Автор. Согласно современным представлениям, вакуум — это не пустота в прямом понимании данного слова. В этой «пустоте» непрестанно рождаются и уничтожаются всевозможные частицы. Аристотелевская идея «природа не терпит пустоты» возродилась в наше время, но, разумеется, на качественно новом уровне. Впрочем, не будем забегать вперёд; мы поговорим о физическом вакууме позднее, при рассмотрении современной естественнонаучной картины мира.

Элементарные частицы в 1964 г. Если до 1932 г. было известно всего три элементарные частицы (электрон, протон, фотон) и все они были стабильными, то в 1964 г. — через три десятилетия — число элементарных частиц стало измеряться сотнями; в настоящее время их известно более 300. Практически все они оказались нестабильными, причём у подавляющего большинства время жизни составляет всего лишь $10^{-22}-10^{-23}c$ (столь мало живущие частицы называют «резонансами»). Сначала новые частицы обнаруживались не слишком часто. Так, в 30-е годы к нейтрону добавился мюон, а затем пион. В те годы новые частицы искали, главным образом, в космическом излучении. С конца 40-х годов исследования элементарных частиц стали перемещаться в лаборатории, оборудованные ускорителями заряженных частиц. С годами мощность ускорителей (энергия, до которой ускорялись в них частицы) неуклонно нарастала — рос и список элементарных частиц, всё глубже познавались их свойства, открывались новые закономерности. В конце 40-х — первой половине 50-х годов была открыта довольно большая группа частиц, получившая название «странные частицы»; для объяснения особенностей поведения этих частиц была введена сохраняющаяся только в слабых взаимодействиях величина — странность (специфический безразмерный «заряд» частицы, отсутствовавший у всех открытых ранее частиц).

Итак, в 1964 г. число элементарных частиц измерялось сотнями (позднее мы объясним выбор года). Правда, как уже было сказано, подавляющее большинство частиц характеризовалось исключительно малым временем жизни, не превышающим $10^{-22}c$. Если не учитывать все эти частицы, то число частиц сокращается до 19. Их распределили по трём семействам.

Первое семейство состояло всего из одной частицы — фотона γ.

Второе семейство образовывали *лептоны*. По-гречески «лептос» означает «мелкий, лёгкий» (лепта — мелкая монета). В рассматриваемое нами время это семейство состояло из 4 частиц: электрона e^-, мюона μ^-, электронного нейтрино ν_e и мюонного нейтрино ν_μ. Экспериментальное доказательство существования электронного нейтрино было дано в 1956 г., а наличие двух разных типов нейтрино доказано в 1962 г.

Третье, наиболее многочисленное семейство было названо *адронами*. Термин «адрон», как и термин «ядро», происходит от греческого «хадрос» — «массивный, тяжёлый». Отметим, что все «резонансы» относятся к семейству адронов. В данном семействе различают два подсемейства — *мезоны* и *барионы*. Без учёта «резонансов» подсемейство мезонов состоит из 5 частиц: положительного пиона π^+, нейтрального пиона π^0, положительного каона K^+, нейтрального каона K^0, нейтрального эта-мезона η^0, а подсемейство барионов состоит из 9 частиц: протона p, нейтрона n и семёрки гиперонов (лямбда-гиперона

Λ, трёх сигма-гиперонов Σ^-, Σ^0, Σ^+, двух кси-гиперонов Ξ^-, Ξ^0 и омега-гиперона Ω^-. Каоны и гипероны как раз и являются теми «странными частицами», о которых говорилось ранее.

Таблица 1

Семейства частиц		Символ частицы	Символ античастицы	Масса	Спин	Электрический заряд частицы	Время жизни	Странность частицы	Продукты распада частицы
Фотон		γ		0	1	0	∞		
Лептоны		e^-	e^+	1	1/2	–1	∞		—
		ν_e	$\tilde{\nu}_e$	0	1/2	0	∞		—
		μ^-	μ^+	207	1/2	–1	$2{,}2\cdot10^{-6}$		$(e^-\nu_\mu\tilde{\nu}_e)$
		ν_μ	$\tilde{\nu}_\mu$	0	1/2	0	∞		—
Адроны	Мезоны	π^+	π^-	273	0	+1	$2{,}6\cdot10^{-8}$	0	$(\mu^+\nu_\mu)$
		π^0		264	0	0	$0{,}8\cdot10^{-16}$	0	$(\gamma\gamma)$ (γe^-e^+)
		K^+	K^-	966	0	+1	$1{,}2\cdot10^{-8}$	+1	$(e^+\nu_e\pi^0)$ $(\mu^+\nu_\mu)$ $(\pi^+\pi^0)$
		K^0	$\tilde{K}^0$	974	0	0	$\left\{\begin{matrix} K_S: 10^{-10} \\ K_L: 5{,}4\cdot10^{-8}\end{matrix}\right\}$	+1	$\left\{\begin{matrix} (\pi^+\pi^-)(\pi^0\pi^0) \\ \left\{\begin{matrix}(3\pi^0)(\pi^0\pi^+\pi^-) \\ (\pi^-e^+\nu_e)\end{matrix}\right.\end{matrix}\right\}$
		η^0		1074	0	0	10^{-17}	0	$(\gamma\gamma)$ $(\pi^0\gamma\gamma)$ $(3\pi^0)$ $(\pi^0\pi^+\pi^-)$
	Барионы	p	$\tilde{p}$	1836,1	1/2	+1	∞	0	—
		n	$\tilde{n}$	1838,6	1/2	0	960	0	$(pe^-\tilde{\nu}_e)$
		Λ^0	$\tilde{\Lambda}^0$	2183	1/2	0	$2{,}5\cdot10^{-10}$	–1	$(p\pi^-)$ $(n\pi^0)$
		Σ^+	$\tilde{\Sigma}^+$	2328	1/2	+1	$8\cdot10^{-11}$	–1	$(p\pi^0)$ $(n\pi^+)$
		Σ^0	$\tilde{\Sigma}^0$	2334	1/2	0	10^{-14}	–1	$(\Lambda^0\gamma)$
		Σ^-	$\tilde{\Sigma}^-$	2343	1/2	–1	$1{,}5\cdot10^{-10}$	–1	$(n\pi^-)$
		Ξ^0	$\tilde{\Xi}^0$	2573	1/2	0	$3\cdot10^{-10}$	–2	$(\Lambda^0\pi^0)$
		Ξ^-	$\tilde{\Xi}^-$	2586	1/2	–1	$1{,}7\cdot10^{-10}$	–2	$(\Lambda^0\pi^-)$
		Ω^-	$\tilde{\Omega}^-$	3273	1/2	–1	$1{,}3\cdot10^{-10}$	–3	$(\Xi^0\pi^-)$ $(\Xi^-\pi^0)$ (Λ^0K^-)

Из перечисленных 19 частиц только у трёх (γ, π^0, η^0) нет античастиц; можно сказать, что эти три частицы тождественны своим античастицам, их называют *истинно нейтральными* частицами. У остальных 16 частиц есть античастицы. Они отличаются от частиц знаком электрического заряда (если он есть) и знаками всех специфических зарядов (на-

пример, знаком странности). У истинно нейтральных частиц все заряды равны, очевидно, нулю.

В таблице 1 собраны рассматриваемые 19 частиц. Указаны их масса (выраженная в массах электрона), спин, знак электрического заряда, среднее время жизни в секундах; для адронов указана также странность. Кроме того, в таблице приведены продукты распада частиц (они даны в скобках). Видно, что во многих случаях имеется не одна, а две и более возможных схем распада частицы. Различают два нейтральных каона — короткоживущий (K_S) и долгоживущий (K_L); они отличаются друг от друга временем жизни и схемами распада. Как видно из таблицы, все лептоны и барионы имеют полуцелый спин, поэтому они являются *фермионами*; фотон и мезоны относятся к *бозонам*.

Основные типы взаимодействий. С учётом «резонансов» почти все элементарные частицы попадают в семейство адронов. С чем же связано выделение относительно малочисленного семейства лептонов? В этом семействе объединены частицы, *не участвующие в сильном взаимодействии.* Поэтому, говоря о классификаций частиц, надо рассказать и об основных типах взаимодействий.

Этих взаимодействий четыре: *гравитационное, слабое, электромагнитное, сильное.* Рассматривая элементарные частицы, можно ограничиться тремя последними типами взаимодействий.

Сильное (ядерное) взаимодействие отвечает за связь нейтронов и протонов в атомных ядрах, за многообразные ядерные реакции и, в частности, за те реакции, которые приводят к высвобождению энергии в активной зоне реактора атомной электростанции. С *электромагнитным взаимодействием* мы встречаемся, пожалуй, наиболее часто: при изучении электрических и магнитных явлений, свойств вещества и электромагнитного, в частности оптического, излучения.

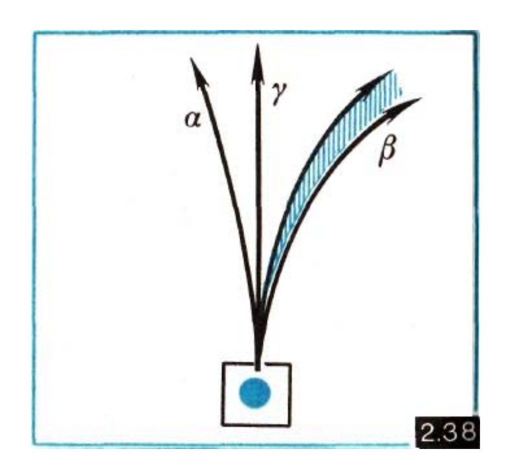
Это взаимодействие определяет строение и свойства атомов и молекул. Оно включает в себя наряду с кулоновскими силами и силами, действующими на проводник с током, также силы давления, трения, сопротивления, упругости, химические силы и т. д. В электромагнитном взаимодействии участвуют все частицы, за исключением обоих нейтрино. *Слабое взаимодействие* определяет процессы, протекающие в «интимной» сфере самих элементарных частиц; оно ответственно за взаимодействия частиц, происходящие с участием нейтрино или антинейтрино (в частности, процессы β-распада). Кроме того, оно определяет безнейтринные процессы распада, характеризующиеся относительно большим временем жизни распадающейся частицы — порядка $10^{-10}c$ или больше. К таким распадам относятся распады каонов и гиперонов. В слабом взаимодействии участвуют все частицы.

Типы взаимодействий существенно различаются силами или, более точно, энергией взаимодействия. Сильное взаимодействие примерно в 100 раз превосходит электромагнитное и в 10^{14} раз — слабое. Чем *сильнее* взаимодействие, тем *быстрее* оно справляется со своей работой. Так, время жизни «резонансов», распад которых связан с сильным взаимодействием, имеет порядок $10^{-22}-10^{-23}c$; время жизни нейтрального пиона, распадающегося за счёт электромагнитного взаимодействия ($\pi^0 \to \gamma + \gamma$) составляет $10^{-16}c$; для распадов же, за которые ответственно слабое взаимодействие, характерны времена жизни $10^{-8}-10^{-10}c$. Сильное взаимодействие приводит к быстропротекающим процессам, слабое — к относительно медленным процессам. Время протекания процесса определяют как величину, обратную вероятности этого процесса, отнесённой к единице времени. Чем медленнее процесс, тем меньше эта вероятность. Характерные для слабого взаимодействия процессы с участием нейтрино являются крайне маловероятными — недаром нейтрино практически свободно проходят через весь земной шар.

В отличие от электромагнитного, сильное и слабое взаимодействия проявляются на очень коротких расстояниях, иными словами, имеют весьма малый радиус действия. Сильное взаимодействие проявляется тогда, когда частицы сближаются до расстояния по-

рядка $10^{-15}\,м$. Радиус действия слабого взаимодействия ещё меньше — он не превышает примерно $10^{-18}\,м$.

Рисунок 2.38 можно встретить во многих учебниках и учебных пособиях по физике, в том числе школьных. Он иллюстрирует три типа распада атомного ядра — α-распад, β-распад и γ-распад. В магнитном поле положительно заряженные α-частицы (ядра ^4He) отклоняются в одну сторону, а отрицательно заряженные β-частицы (электроны) — в другую; γ-излучение магнитным полем вообще не отклоняется. Данный рисунок можно рассматривать как символ трёх фундаментальных взаимодействий, поскольку α-распад есть проявление сильного взаимодействия, β-распад — слабого, а γ-распад — электромагнитного.



Несмотря на существенные различия между электромагнитным и слабым взаимодействиями, удалось создать в 60-х годах и экспериментально подтвердить в 70 – 80-х годах *единую теорию* этих взаимодействий; появился термин «электрослабое взаимодействие». Создатели единой теории — А. Салам (р. 1926), С. Вайнберг (р. 1933) и Ш. Глэшоу (р. 1932). Читателю будет интересно познакомиться со следующим отрывком из нобелевской лекции Глэшоу, имеющей довольно поэтическое название «На пути к объединённой теории — нити в гобелене». Глэшоу начал свою лекцию так: «В 1956 г., когда я начал заниматься теоретической физикой, наука об элементарных частицах напоминала лоскутное одеяло. Электродинамика, слабые взаимодействия и сильные взаимодействия были чётко разграниченными дисциплинами, преподаваемыми и изучаемыми раздельно. Связной теории, которая бы описывала их в совокупности, не было. Такие достижения, как наблюдение несохранения чётности, успехи квантовой электродинамики, открытие адронных резонансов и странности, были вполне определёнными частями картины, но их было непросто подогнать друг к другу.

Положение вещей изменилось... Теория, которой мы сейчас располагаем,— это цельное произведение искусства. Лоскутное одеяло превратилось в гобелен. Гобелены создают много мастеров, работающих вместе. Из законченной работы невозможно выделить вклады отдельных работников, а пропущенные или неверные нити перекрыты другими. То же и в нашей картине физики частиц. Одна часть картины — объединение слабых и электромагнитных взаимодействий и предсказание нейтральных токов, отмечаемое сейчас присуждением Нобелевской премии. Другая часть связана с убедительной эволюцией кварковой гипотезы от чистой фантазии к установившемуся учению. Ещё одна часть — развитие квантовой хромодинамики и превращение её в мощную, предсказательную и внушающую доверие теорию сильных взаимодействий. Всё соткано вместе и переплетено в гобелене; один кусок имеет мало смысла без другого. Поэтому и развитие электрослабой теории было не таким простым и прямым, как это могло показаться. Она не возникла, вспыхнув целиком в уме одного или даже трёх физиков, а является результатом коллективных усилий многих учёных — и экспериментаторов, и теоретиков» [84, с. 51 – 52]. Глэшоу упомя-

нул здесь о кварковой гипотезе и квантовой хромодинамике. Гипотеза кварков, выдвинутая в 1964 г., действительно открыла новый этап в физике элементарных частиц, поэтому остановимся на ней более подробно.

Кварковая структура адронов. Обилие адронов невольно наталкивало физиков на предположение, что эти частицы не являются, по сути дела, элементарными, а представляют собой некие структурные образования. В 1964 г. М. Гелл-Манн (р. 1929) и Д. Цвейг (р. 1937) выдвинули гипотезу, согласно которой адроны состоят из неких частиц, названных *кварками*. Как подтвердило время, эта гипотеза оказалась исключительно плодотворной. Так что 1964 г. можно считать для физики элементарных частиц столь же переломным, как и 1932 г.

Вначале рассматривались три кварка — u, d, s — и, соответственно, три антикварка: $\overline{u}$, $\overline{d}$, $\overline{s}$. В таблице 2 приведены дли них электрический заряд (единицей измерения служит абсолютное значение заряда электрона), спин, странность; s-кварк является «носителем странности». Все кварки, как видно из таблицы, относятся к фермионам. Пожалуй, самое удивительное в них то, что они обладают не целочисленным, а дробным электрическим зарядом, равном одной или двум третям заряда электрона.

Таблица 2

Наименование	Символ	Электрический заряд	Спин	Странность
Кварки	u	$+2/3$	$1/2$	0
	d	$-1/3$	$1/2$	0
	s	$-1/3$	$1/2$	-1
Антикварки	$\overline{u}$	$-2/3$	$1/2$	0
	$\overline{d}$	$+1/3$	$1/2$	0
	$\overline{s}$	$+1/3$	$1/2$	$+1$

Адроны строятся из кварков по следующему правилу: *барион состоит из трёх кварков (антибарион — из трёх антикварков), а мезон образуется из кварка и антикварка.* Так, пион π^+ имеет кварковую структуру $u\overline{d}$, а его античастица π^- — структуру $\overline{u}d$. В структуре каонов есть странный антикварк: $K^+ = u\overline{s}$, $K^0 = d\overline{s}$. Соответственно для антикаонов имеем: $K^- = \overline{u}s$, $\overline{K}^0 = \overline{d}s$. Приведём также кварковую структуру долгоживущих барионов: $p = uud$, $n = udd$, $\Lambda^0 = uds$, $\Sigma^+ = uus$, $\Sigma^0 = uds$, $\Sigma^- = dds$, $\Xi^0 = uss$, $\Xi^- = dss$, $\Omega^- = sss$. Антибарионы имеют аналогичную структуру, но только не из кварков, а из антикварков.

Мы видим, что гипероны Λ^0 и Σ^0 имеют одинаковую кварковую структуру; есть структуры с двумя одинаковыми кварками, а гиперон Ω^- состоит из трёх одинаковых кварков. Кварки — фермионы, поэтому в одном состоянии не может находиться более одного кварка данного типа. Всё это означает, что с каждым кварком нужно связывать несколько различных состояний. Так, надо учитывать возможность двух спиновых состояний кварка (две возможных ориентации спина кварка — «вверх» и «вниз»). Однако в случае Ω^--гиперона этот учёт ничего не даёт: спин гиперона равен 3/2, значит, все три кварка находятся здесь в одном и том же спиновом состоянии. Эти три кварка должны различаться по какому-то дополнительному параметру. В теории кварков данный параметр называют «цветом».

Итак, каждый кварк (антикварк) существует в трёх разновидностях, называемых *цветами*. Условно цвета кварков называют жёлтым, красным, синим, а цвета антикварков — оранжевым, фиолетовым, зелёным. Разумеется, понятию цвета кварка или антикварка не надо придавать буквального смысла. Используется лишь оптическая аналогия: смешение

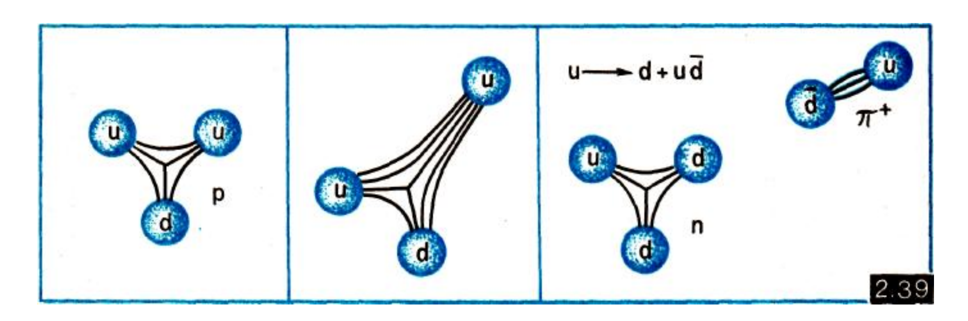
жёлтого, красного и синего цветов (равно как оранжевого, фиолетового, зелёного) даёт бесцветную (белую) композицию. Существенно, что в состав любого бариона входят кварки разных цветов, иначе говоря, в каждом барионе «перемешаны три основных цвета», так что барионы оказываются «бесцветными» объектами. Мезоны тоже «бесцветны», так как в них синий кварк комбинируется с оранжевым антикварком, красный кварк — с зелёным антикварком, жёлтый кварк — с фиолетовым антикварком. «Бесцветность» адронов — принципиальное свойство. В теории кварков (квантовой хромодинамике) есть «правило невылетания цвета», согласно которому *в свободном состоянии могут находиться лишь «бесцветные» объекты*. Это правило объясняет, почему, например, кварки не могут существовать в свободном состоянии.

Действительно, настойчивые многолетние поиски свободных кварков оказались безуспешными: расщепить адроны на составляющие их кварки так и не удалось. Неудивительно, что довольно долгое время сохранялось сомнение, не является ли гипотеза кварков всего лишь остроумным математическим приёмом. К концу 70-х годов физики перестали сомневаться в том, что кварки в адронах реально существуют. Что убедило их? Прежде всего, три кварка (плюс три антикварка) позволили сконструировать все адроны и антиадроны, открытые до 1974 г. Примечательно, что такое конструирование не порождало лишних объектов — все полученные «конструкции» были в конечном счёте обнаружены на опыте. Кварковая модель позволила правильно рассчитать различные характеристики адронов, вероятности взаимопревращений и т. д. Опыты по рассеянию электронов высоких энергий на протонах позволили в буквальном смысле нащупать кварки внутри протона. Теоретический анализ этих опытов показал, что внутри адронов электроны рассеиваются на центрах с зарядами + 2/3 и – 1/3 и спином 1/2. Реальность кварковой гипотезы окончательно подтвердило её дальнейшее развитие — открытие новых типов частиц, получивших экзотическое название «очарованные частицы». Это произошло в середине 70-х годов.

В 1974 г. был открыт ещё один истинно нейтральный мезон — джей-пси-мезон J/ψ (спин 1, масса около $6000\,m_e$, время жизни порядка $10^{-20}c$). Для объяснения его свойств и прежде всего времени жизни (оно оказалось в 1000 раз больше, чем следовало из существовавшей теории) пришлось ввести новую величину, сохраняющуюся только в слабом взаимодействии; её назвали «очарованием». Пришлось постулировать также существование нового кварка; его назвали *c*-кварком (charm — очарование). Электрический заряд нового кварка равнялся + 2/3. Кварковая структура J/ψ-мезона есть $c\bar{c}$, е ё называют чармонием и рассматривают как атомоподобную систему, похожую на позитроний. Напомним, что позитроний состоит из электрона и позитрона, движущихся вокруг общего центра масс; время жизни позитрония около $10^{-7}c$. Как и всякий атом, чармоний имеет систему уровней энергии; правда, расстояния между этими уровнями в 10^9 раз больше расстояний между уровнями в обычном атоме. Каждому уровню энергии чармония отвечает некая частица, её масса определяется согласно формуле Эйнштейна $E = mc^2$. J/ψ-мезон отвечает одному из уровней чармония: вскоре был открыт ещё ряд мезонов, отвечающих другим уровням. Очарования кварка *c* и антикварка $\bar{c}$ имеют противоположные знаки; поэтому результирующее очарование структуры $c\bar{c}$ равно нулю. Как говорят, структура $c\bar{c}$ обладает скрытым очарованием. Мезоны с явным очарованием были открыты летом 1976 г.: $D^0 = c\bar{u}$ и $D^+ = c\bar{d}$; их свойства оказались в полном согласии с гипотезой очарованного *c*-кварка.

Итак, *можно полагать доказанным существование кварков внутри адронов*. Однако вырвать оттуда кварки нельзя; в природе наблюдаются в свободном состоянии только «бесцветные» объекты. В связи с этим используют термин «конфайнмент» (в переводе с английского — «пленение, тюремное заключение»). Конфайнмент объясняется следующим образом. Между кварками существует взаимодействие; собственно говоря, это и есть то самое сильное взаимодействие, о котором шла речь выше. «Переносчиками» этого

взаимодействия являются «цветные» частицы — *глюоны* (от английского glue — клей). Как и фотоны, глюоны не имеют массы покоя, их спин равен 1. Однако у них есть очень существенное отличие от фотонов. Фотоны не имеют каких-либо зарядов и практически не взаимодействуют друг с другом — один световой пучок беспрепятственно проходит сквозь другой (взаимодействие фотонов обнаруживается лишь в нелинейных средах). Глюоны обладают специфическим зарядом — «цветом», в связи с чем различают 8 глюонов. *Глюоны сильно взаимодействуют друг с другом*; глюоны рождают глюоны. В результате взаимодействие между кварками с увеличением расстояния между ними не убывает, а, напротив, *растёт.* Всё это приводит к тому, что сильное взаимодействие оказывается «запертым» в пределах области размером около $10^{-15}\,м$, т. е., иначе говоря, приводит к конфайнменту как самих глюонов, так и кварков. Всякая попытка выбить кварк из адрона оборачивается тем, что энергия, затрачиваемая на выбивание, идёт сначала на рождение новых глюонов и затем приводит к образованию пары из кварка и антикварка. Это схематически показано на рисунке 2.39: попытка выбить кварк u из протона приводит, в конечном счёте, к образованию двух новых «бесцветных» объектов — нейтрона и положительного пиона. Изображённое на рисунке превращение $p \to n + \pi^+$ на языке кварков имеет вид: $u \to d + u\bar{d}$.



Учитель. Ранее Вы говорили, что «переносчиком» сильного взаимодействия являются пионы. Теперь же в этой роли выступают глюоны. Что правильно?

Автор. Мы рассматривали ранее взаимодействие протона и нейтрона и рисовали в связи с этим диаграмму (см. рис. 2.37). Чтобы проявилось взаимодействие между протоном и нейтроном, необходимо их сближение на расстояние $10^{-15}\,м$, т. е. на расстояние порядка диаметра адрона. На таких расстояниях глюоны обеспечивают превращения $u \to d + u\bar{d}$ и $d + u\bar{d} \to u$. Легко видеть, что эти превращения соответствуют превращениям в точках *1*, *3* и *2*, *4* на упомянутой диаграмме. Так что прежняя и нынешняя точки зрения вполне согласуются друг с другом.

Учитель. Понятно. А энергией глюоны обмениваются с физическим вакуумом.

Фундаментальные бозоны и фундаментальные фермионы. С появлением кварковой модели адронов и созданием единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий таблица 1, приведённая выше, уже не даёт правильного представления об «элементарных кирпичиках» материи. Сегодня список таких «первоначал» состоит из 13 фундаментальных бозонов и 12 фундаментальных фермионов.

Фундаментальные бозоны — «переносчики» основных взаимодействий; их рассматривают как возбуждения силовых полей, отвечающих основным взаимодействиям. Фундаментальными бозонами являются следующие элементарные частицы: фотон (электромагнитное взаимодействие), 8 глюонов (сильное взаимодействие), 3 промежуточных бозона (слабое взаимодействие) и гипотетический гравитон (гравитацинное взаимодействие). Существование промежуточных бозонов W^+, W^-, Z было предсказано теорией Салама — Вайнберга — Глэшоу; они были открыты в 1983 г. Если фотон и глюоны не име-

ют массы покоя, то промежуточные бозоны, напротив, обладают огромной массой: у *W*-бозона масса 160 000 m_e, а у *Z*-бозона — 180 000 m_e.

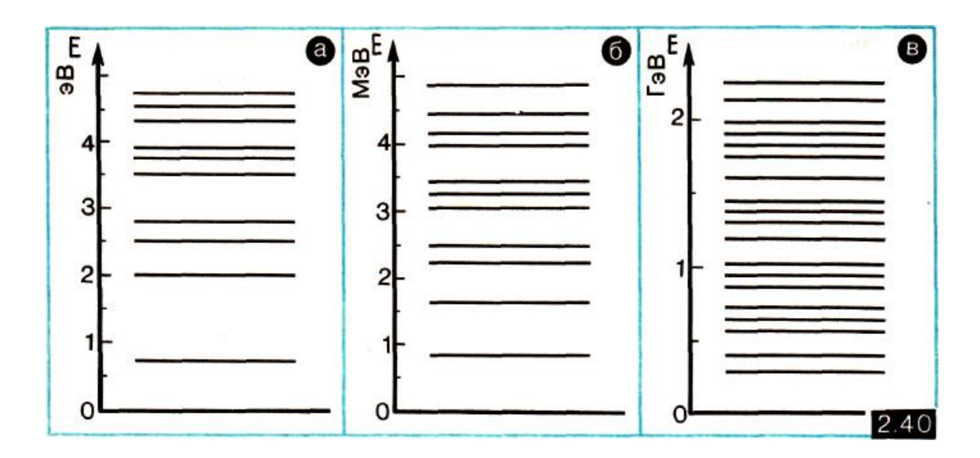
Фундаментальными фермионами являются лептоны и кварки. Все процессы с участием лептонов и адронов могут быть представлены теперь как *кварк-лептонные процессы*. Так, распад нейтрона $n \to p + e^- + \overline{\nu}_e$ следует рассматривать как соответствующее превращение одного из *d*-кварков, входивших в состав нейтрона: $d \to u + e^- + \overline{\nu}_e$. Столкновение нейтрино с нейтроном, приводящее к рождению протона и электрона, сводится к столкновению нейтрино с *d*-кварком, в результате чего *d*-кварк превращается в *u*-кварк и при этом рождается электрон: $\nu_e + d \to u + e^-$.

До 1974 г. физикам были известны 4 лептона (e^-, ν_e, μ^-, ν_μ) и 3 кварка (*u*, *d*, *s*). Эта ситуация их не устраивала: из теории следовало, что число лептонов должно быть равно числу кварков (*кварк-лептонная симметрия*). В 1974 г. с появлением четвертого кварка (*c*-кварка) лептоны и кварки сравнялись по числу. Однако вскоре, в 1975 г., был открыт пятый лептон — таон τ^- (масса $3500\, m_e$, время жизни около $10^{-12} c$) и появились веские доводы в пользу существования третьего нейтрино — таонного нейтрино ν_τ. Таким образом, число лептонов увеличилось до шести. Начались интенсивные поиски пятого и шестого кварков, закончившиеся, в конечном счёте, успешно. Новые кварки назвали *b*-кварком (носитель новой физической величины — «прелести»; *beauty* — прелесть) и *t*-кварком (*truth* — истина). У *b*-кварка электрический заряд равен – 1/3, а у *t*-кварка + 2/3.

Итак, 6 лептонов (e^-, ν_e, μ^-, ν_μ, τ^-, ν_τ) и 6 кварков (*u*, *d*, *s*, *c*, *b*, *t*) — вот на сегодня полный перечень фундаментальных фермионов. Они довольно естественно разбиваются на три группы, которые принято называть поколениями. *Первое поколение: u, d,* e^-, ν_e. *Второе поколение: s, c,* μ^-, ν_μ. *Третье поколение: b, t,* τ^-, ν_τ. Частицы первого поколения самые лёгкие, третьего — самые тяжёлые. Из частиц первого поколения, обладающих электрическим зарядов построены атомы, иными словами, построено всё вещество во Вселенной. Электронное нейтрино тоже играет важную роль — оно, например, участник процессов, протекающих на Солнце. С первым поколением всё достаточно ясно. Что же касается второго и особенно третьего поколений, то здесь, напротив, пока сплошные загадки. Мы пока не знаем, зачем нужны природе частицы этих поколений.

Три этапа в познании строения вещества. На протяжении нынешнего столетия физика прошла три этапа в познании строения вещества. *На первом этапе рассматривалось строение атомов и молекул,* была исследована электронная оболочка атомов и молекул, её роль в образовании химических связей. *На втором этапе исследовалось строение атомного ядра* как объекта, состоящего из протонов и нейтронов. *На третьем этапе изучалась структура самих протонов и нейтронов* или, более широко, *кварковая структура адронов.*

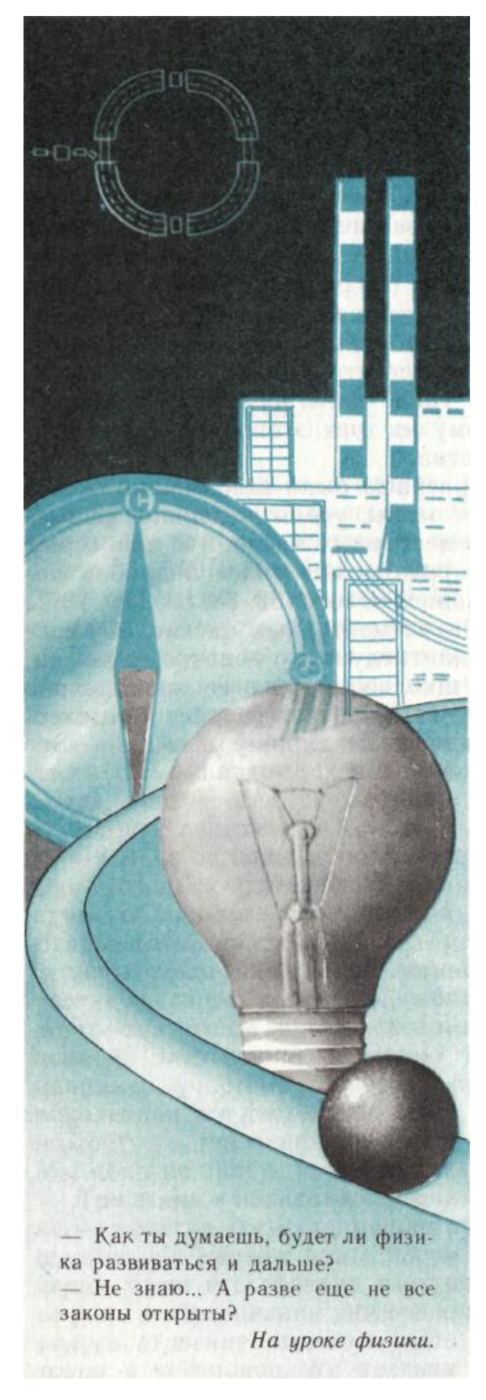
Если объект обладает какой-то внутренней структурой, он будет характеризоваться внутренней динамикой, внутренними движениями. Согласно квантовой физике, энергия таких движений *квантуется* — образует *дискретный спектр.* На рисунке 2.40 приведены три спектра. Внешне они похожи друг на друга; однако у этих спектров есть существенное различие в разности энергий уровней. В случае *(а)* указанная разность составляет $0{,}1 - 1\, эВ$; перед нами характерный спектр уровней атома. В случае *(б)* разность энергий уровней в миллион раз больше: $0{,}1 - 1\, МэВ$ — это характерный спектр атомного ядра. Наконец, в случае *(в)* расстояние между уровнями ещё в тысячу раз больше: $0{,}1 - 1\, ГэВ$ — это спектр адрона. Три приведённых спектра — иллюстрации к *трём спектроскопиям*; каждая спектроскопия соответствует одному из трёх этапов познания современной физикой строения вещества.



Конечно, в рамках данного параграфа было невозможно сколь-либо детально рассмотреть все эти этапы, уделить должное внимание ядерной физике и физике элементарных частиц. С вопросами физики элементарных частиц читатель может более подробно познакомиться по многим книгам. Укажем из них [82, 88, 89, 119, 137].

Заметим, что при рассмотрении элементарных частиц в школе возникает вопрос, насколько глубоко следует это делать. Полагаем, что тема элементарных частиц в школьном курсе физики должна преподноситься не как самостоятельный раздел, а как определённый этап в процессе познания человеком «природы вещей». Это и определит глубину её проработки.

Диалог. О путях дальнейшего развития физики



— Как ты думаешь, будет ли физика развиваться и дальше?
— Не знаю... А разве еще не все законы открыты?
На уроке физики.

Учитель. Современная физика всё глубже познаёт материю. А насколько всё это нужно? Не отдаляемся ли мы всё больше и больше от того, что в действительности окружает нас? Мы не понимаем, зачем природе фундаментальные фермионы второго и третьего поколений. Человек, наверное, тоже вполне может обойтись без них. Зачем ему гипероны, каоны, таоны? Не следует ли сознательно ограничить собственную любознательность? Очень интересное соображение на этот счёт есть в «Потерянном рае» Джона Мильтона: «Ум или воображение, не зная пределов, блуждают в бесконечном лабиринте, пока предостережение или опыт не научат нас, что высшая мудрость состоит не в глубоком познании далёких от нас вещей, отвлечённых, тёмных, но в уразумении того, что видим мы перед собою в повседневной жизни. Всё остальное — дым, суета, безумие, могущее сделать нас ещё более неопытными и наивными в суждении о наиболее близких нам вещах, вечно недовольными».

Автор. Человек всегда стремился понять всё, что его окружает, и всегда стремился проникнуть всё глубже в сущность явлений. Противоестественно и бессмысленно пытаться как-то ограничивать любознательность, гасить пытливость: ума.

Учитель. Но не получается ли, что в исследованиях по физике элементарных частиц (там, где, как принято считать, проходит передний край физических исследований) мы всё больше углубляемся в мир, который *сами же* создали в своих лабораториях на сверхмощных ускорителях частиц? С огромным трудом созданные на этих ускорителях экзотические частицы мгновенно гибнут. Где они встречаются в природе? А главное, зачем их изучать, если они заведомо не играют никакой роли в нашей жизни?

Автор. Вы слишком категоричны. Что, собственно говоря, означает «играть роль в нашей жизни»? Или сначала ещё проще: что такое «наша жизнь»? Условия жизни людей всё время меняются. Три тысячи лет назад были получены чистые металлы, которые, между прочим, нельзя найти в естественных условиях, и это радикально изменило условия жизни человека. Во времена Галилея занятия электричеством казались совершенно оторванными от жизни, однако сегодня нельзя представить себе нашу жизнь без электричества. В начале века проблема строения атомного ядра представляла чисто академический интерес; сегодня энергия от деления ядер используется в двигателях и для получения электричества, а завтра энергия термоядерного синтеза позволит навсегда избавить человечество от энергетического голода.

Учитель. Понимаю, Вы хотите сказать, что сегодняшние чисто научные исследования

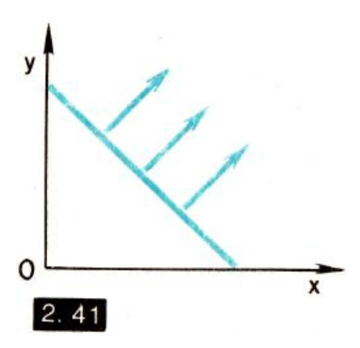
могут завтра найти практическое применение. Однако является ли этот тезис абсолютно верным? Можно ли надеяться, что гипероны, промежуточные бозоны, кварки, замурованные внутри частиц, *когда-либо* найдут практические применения?

Автор. Пока об этом трудно судить. Но вернёмся к Вашим словам «не играют никакой роли в нашей жизни» и подумаем, что же означает «играть роль в нашей жизни». Наверное, нельзя сводить эту роль к практическим применениям. Надо учитывать также интеллектуальное воздействие фундаментальных физических исследований. Даже если бы и в самом деле оказалось, что высокоэнергетическая физика элементарных частиц не имеет никакого отношения к материальному миру, в котором мы живём, то и тогда было бы исключительно важно её влияние на наш духовный мир. Постижение «первоначал вещей» и «первопричин явлений» способствует росту интеллектуального уровня, воздействует на формирование системы основных концепций общества. Можно ли представить себе современную естественнонаучную картину мира без кварковой структуры частиц? *Человек, не ведающий сегодня о кварках, столь же ущербен, как и человек, который в начале века ничего не слыхал об электронах.*

Учитель. Ну, если только имеется в виду общее развитие…

Автор. Не только. Существует тесная связь между физикой элементарных частиц и космологическими проблемами. Раньше природа изучалась только в том виде, в каком она существовала в то время. Теперь в центре внимания оказываются вопросы *эволюции* Вселенной, *происхождения* всего, что мы видим вокруг себя. Принципиально важную роль сыграла в этом физика элементарных частиц.

Учитель. И всё же у меня остаётся серьёзное сомнение в целесообразности неограниченного развития *фундаментальных исследований*. Современная физика элементарных частиц предполагает сооружение всё более дорогостоящих ускорителей. А между тем развитие общества требует вкладывания средств в многочисленные *прикладные направления*. Не следует ли пожертвовать дорогостоящими фундаментальными исследованиями в пользу исследований прикладного, практического характера? Иначе говоря, не следует ли ограничиться достигнутой глубиной понимания строения вещества и сосредоточиться на изучении плазмы, твёрдого тела, сверхпроводимости, лазерной физики и т. п.?



2.41

Автор. Вы поставили серьёзный вопрос. Следуя В. Вайскопфу [17], представим условно схему развития физики так, как это изображено на рисунке 2.41. По оси *Y* отложены фундаментальные исследования — от атома к атомному ядру, от ядра к элементарным частицам, а по оси *X* отложены прикладные исследования. В целом физическая наука развивается в направлении, показанном стрелками; прямая линия изображает передний фронт науки. Если указанная прямая будет идти слишком круто (явное преобладание фундаментальных исследований), то это приведёт к действительному отрыву науки от жизни, наука лишится живительной связи с практикой. Но не менее опасна и другая крайность. Если прямая будет слишком пологой (явное преобладание прикладных исследований), неизбежно наступит умственное, а затем и техническое вырождение науки. Физика может развиваться лишь при оптимальном наклоне рассматриваемой прямой — не слишком крутом и не слишком пологом. Это означает, что *между фундаментальными и прикладными исследованиями есть глубокая связь*; прогресс в одном направлении невозмо-

жен без прогресса в другом.

Учитель. Но как далеко мы будем идти по оси *Y*? Бесконечен или же конечен процесс постижения «первоначал» и «первопричин»? Вы говорили о трёх этапах познания строения вещества. Будут ли четвертый, пятый и другие этапы?

Автор. Думаю, что продвижение по оси *Y*, равно как и продвижение по оси *X*, будет происходить всё время, пока существует человечество.

Учитель. Но разве нельзя предположить, что когда-то человек откроет истинные «первоначала» и «первопричины»? И не будет ли это означать *окончание* развития физики?

Автор. Ваше предположение несостоятельно. Процесс познания бесконечен. Мы бесконечно приближаемся к истине через последовательность относительных истин. Я полагал, что это принципиальное обстоятельство Вам известно.

Учитель. Конечно, известно. Однако если предположить, что человек полностью познал законы, определяющие поведение элементарных частиц, то, поскольку все физические объекты состоят в конечном счёте из этих частиц, можно заключить, что полностью описано и поведение всех объектов. Разве это не есть конец развития физики?

Автор. Невозможно познать законы элементарных частиц полностью. Вы обязательно будете иметь дело с некоей идеализацией.

Учитель. Но почему обязательно?

Автор. Говорить, в принципе, о завершении какой-либо науки можно только при условии, что эта наука чётко отделена, *изолирована* от других научных направлений. Физика же не имеет чётко определённых границ; *их просто не может быть*. Существенно, что по мере развития физики, по мере того, как мы всё больше углубляемся в сущность вещей и явлений, границы становятся всё более условными и неопределёнными. Вспомним: квантовая физика «размыла» существовавшую ранее границу между физикой и химией. Сегодня исследования на уровне микроявлений «размывают» границу между физикой и биологией. *Идти вглубь — это значит выходить на более широкие горизонты.*

Учитель. В этом смысле физика, конечно, будет продолжать развиваться.

Автор. Вы начали диалог цитатой из Джона Мильтона. Я хотел бы закончить его цитатой из работы В. Гейзенберга «Конец физики?» Возражая против допущения возможности окончания развития физики, он писал: «Дело в том, что и замкнутую теорию элементарных частиц — назовем ли мы её «мировой формулой», или иначе — следует понимать как идеализацию. Хотя она строго отображает неслыханно широкую область явлений, вполне могут существовать и другие явления, которые эта идеализация охватить неспособна. Наиболее разительным примером, доказывающим такую возможность, служит биология. Все биологические объекты тоже состоят из элементарных частиц, тем не менее, понятия, в которых обычно описываются биологические процессы, например понятие самой жизни, не встречаются в этой идеализации. Так что физике ещё предстоит развиваться в этом направлении. Возразить на это можно было бы только то, что речь здесь идёт уже не о физике, а о биологии, физика же при этом остаётся завершённой. Однако границы между физикой и смежными науками столь расплывчаты, что подобным различием достигают немногого. Поэтому-то большинство физиков и согласны в том, что именно вследствие неопределённого характера границ, отделяющих физику от смежных дисциплин, говорить о её конце не следует» [32, с. 205 – 206]. В конце цитируемой работы специально подчёркнуто: «... Ближайшее развитие будет характеризоваться именно объединением науки, преодолением исторически сложившихся границ между отдельными дисциплинами» [32, с. 207].

§ 11. СОВРЕМЕННАЯ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНАЯ КАРТИНА МИРА

Рассматривая в данной главе вопросы теории относительности, квантовой механики, ядерной физики, физики элементарных частиц, мы, по сути дела, знакомились с *современной естественнонаучной картиной мира.* Остаётся подвести итоги, выделить основные моменты, расставить некоторые акценты.

Поле и вещество. Сформировавшиеся в рамках электромагнитной картины понятия *поля* и *вещества* как двух видов материи получают дальнейшее развитие в современной картине. Существенно обогащается, углубляется содержание этих понятий. Вместо двух основных типов силовых полей и соответственно двух фундаментальных взаимодействий (электромагнитного и гравитационного) теперь рассматриваются четыре — *гравитационное, слабое, электромагнитное, сильное.* При этом электромагнитное и слабое взаимодействия удалось описать единой теорией. Возбуждения четырёх основных силовых полей интерпретируются на корпускулярном языке как *фундаментальные бозоны*; всего этих бозонов тринадцать. Вещество образуют молекулы, атомы и свободные частицы (лептоны и адроны). В конечном счёте оно состоит из *фундаментальных фермионов* — шести лептонов и шести кварков (не считая антилептонов и антикварков).

В отличие от электромагнитной картины, в современной картине уже *нет непереходимой границы между полем и веществом.* На уровне элементарных частиц происходят взаимопревращения поля и вещества. Так, фотоны могут превращаться в электронно-позитронные пары, а эти пары в процессе аннигиляции превращаются в фотоны.

Взаимопревращения частиц. Характерной чертой мира элементарных частиц является *взаимопревращаемость.* Электромагнитной картине была присуща стабильность; недаром в основе её использовались стабильные «элементарные кирпичики» — электрон и протон, а затем фотон. Оказалось, однако, что стабильность частиц — это *исключение,* особый случай, а *правилом* является как раз нестабильность; *почти все элементарные частицы нестабильны.* Они самопроизвольно распадаются, т. е. превращаются в другие частицы.

Взаимопревращения происходят не только при спонтанных распадах, но и при столкновениях частиц. Предположим, сталкиваются два протона; при этом могут наблюдаться, например, такие превращения:

$$\begin{aligned}
&p+p\to p+n+\pi^{+};\\
&p+p\to p+\Lambda^{0}+K^{+};\\
&p+p\to p+\Sigma^{+}+K^{0};\\
&p+p\to n+\Lambda^{0}+K^{+}+\pi^{+};\\
&p+p\to p+\Xi^{0}+K^{0}+K^{+};\\
&p+p\to p+p+p+\overline{p}.
\end{aligned}\qquad(1)$$

Нетрудно подсчитать, что сумма масс покоя частиц, рождающихся в этих процессах, превышает удвоенную массу покоя протона соответственно в 1,07; 1,36; 1,4; 1,43; 1,73; 2 раза. Значит, в данных процессах должна быть достаточно велика кинетическая энергия сталкивающихся протонов; часть её идёт на образование массы родившихся частиц. Увеличивая кинетическую энергию протонов, можно наблюдать процессы, в которых число рождающихся частиц будет возрастать. В принципе можно вообразить поистине фантастическую картину: столкновение двух протонов, обладающих гигантской энергией, приводит к возникновению целой Галактики!

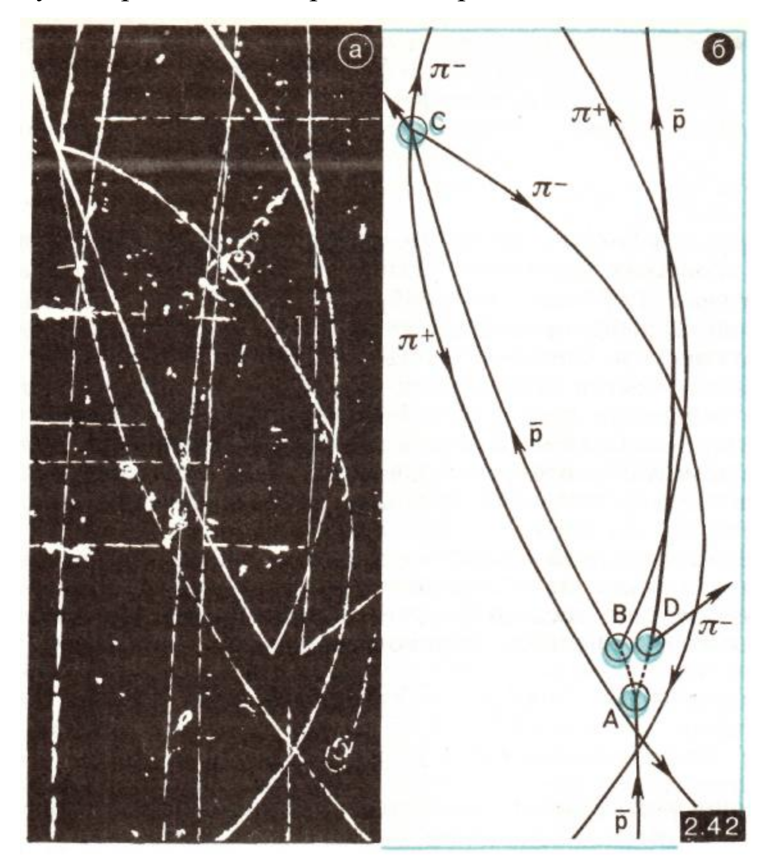
Предположим, что, желая «расщепить» протоны, выбить из них кварки, мы стали бы

обстреливать их фотонами, постепенно увеличивая энергию последних. Вместо расщепления мы наблюдали бы различные процессы взаимопревращений — например, такие:

$$\begin{gathered}\gamma + p \to p + \pi^0; \\ \gamma + p \to n + \pi^+; \\ \gamma + p \to p + \pi^- + \pi^+; \\ \gamma + p \to p + p + \overline{p}.\end{gathered} \quad (2)$$

Этот пример показывает, что благодаря взаимопревращениям частиц оказываются бесплодными попытки расщепить одни частицы, обстреливая их другими. В действительности происходит не расщепление обстреливаемых частиц, а *рождение новых частиц*; они рождаются за счёт энергии сталкивающихся частиц.

Процессы взаимопревращений частиц изучают, используя фотопластинки с очень высоким разрешением или в специальных камерах. На фотопластинке и в камере заряженные частицы оставляют хорошо наблюдаемые следы (треки). Широко используются камеры, заполненные жидким водородом, находящимся в перегретом состоянии. Пролетающая через камеру заряженная частица вызывает кипение водорода вдоль своего пути, в результате чего образуется хорошо видимый трек из мелких пузырьков. Такие камеры называют пузырьковыми. Если поместить пузырьковую камеру в достаточно сильное магнитное поле, то треки частиц окажутся слегка изогнутыми, причём искривление частиц с разными по знаку зарядами будет происходить в разные стороны.



На рисунке 2.42, *а* приведена интересная фотография треков частиц, полученная в 1959 г. на пузырьковой камере с линейными размерами 180 см. Камера обстреливалась пучком антипротонов. На фотографии зарегистрировано редкое событие — антипротон, столкнувшись с протоном, рождает лямбда-гиперон и антилямбда-гиперон: $\overline{p} + p \to \Lambda^0 + \overline{\Lambda^0}$. Расшифровка фотографии дана на рисунке 2.42, *б*. В точке *A* произошло столкновение антипротона с протоном, породившее две электрически нейтральные и поэтому не наблюдаемые на фотографии частицы. В точке *B* антилямбда-гиперон распался

на антипротон и положительный пион: $\overline{\Lambda^0} \to \overline{p} + \pi^+$. Обратим внимание на то, что треки антипротона и пиона искривлены в разные стороны, что связано с разными знаками заряда этих частиц (линии индукции магнитного поля перпендикулярны к плоскости фотографии). В точке C антипротон столкнулся с протоном и произошла аннигиляция по схеме: $\overline{p} + p \to \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + \pi^-$. В точке D лямбда-гиперон распался: $\Lambda^0 \to p + \pi^-$.

На первый взгляд может показаться, что возможны любые превращения частиц. Это, конечно, не так. В мире элементарных частиц действует правило: *разрешено всё, что не запрещают законы сохранения.* Последние играют роль *правил запрета,* регулирующих взаимопревращения частиц. Прежде всего отметим законы сохранения *энергии, импульса* и *электрического заряда*. Кстати говоря, эти три закона объясняют стабильность электрона. Из сохранения энергии и импульса следует, что суммарная масса покоя продуктов распада должна быть меньше массы покоя распадающейся частицы. Значит, электрон мог бы распадаться только на нейтрино и фотоны. Но эти частицы электрически нейтральны. Вот и получается, что электрону просто некому передать свой электрический заряд; поэтому он стабилен.

Существует много специфических «зарядов», сохранение которых регулирует взаимопревращения частиц, — *барионный заряд, лептонный заряд, чётность (пространственная, временная, зарядовая), странность, очарование* и др. Некоторые из них не сохраняются в процессах, обусловленных слабым взаимодействием (чётность, странность, очарование).

Согласно, например, закону сохранения барионного заряда, в любом процессе должна оставаться неизменной разность между числом барионов и антибарионов. Легко видеть, что во всех приведённых выше превращениях частиц эта разность действительно сохраняется. Протон — барион с наименьшей массой; следовательно, среди продуктов его распада барионов быть не может. Этим объясняется стабильность протона — его распад приводил бы к нескомпенсированному уничтожению бариона.

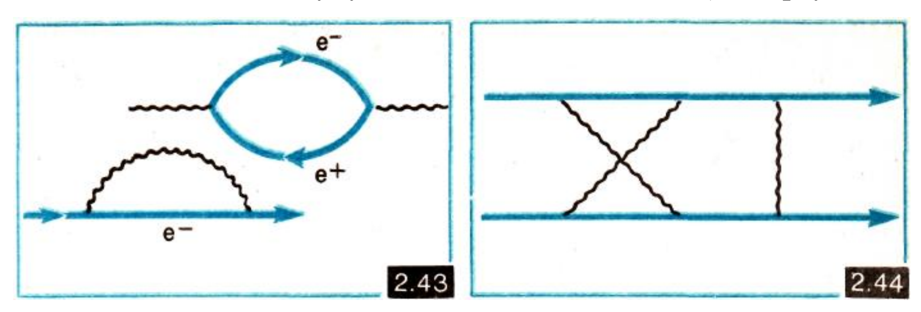
Вероятность в современной картине мира. Как механическая, так и электромагнитная картины были построены на *динамических* (однозначных) закономерностях. Вероятность там допускалась лишь в связи с неполнотой нашего знания; предполагалось, что с ростом знаний и уточнением деталей вероятностные законы должны уступить место динамическим. В современной картине мира мы имеем принципиально иную ситуацию — *здесь вероятностные закономерности оказываются фундаментальными, не сводимыми к динамическим*. Когда, например, фотон сталкивается с протоном, нельзя точно предсказать, какое из превращений (2) произойдёт; можно говорить лишь о вероятности того или иного превращения. Нельзя точно предсказать момент распада той или иной частицы, можно говорить лишь о вероятности распада; приводимое в таблицах время жизни частиц имеет вероятностную природу, оно усреднено по большому числу распадов. Если имеются несколько схем распада частицы, то нельзя точно предвидеть, по какой именно схеме произойдёт распад данной частицы — имеет смысл лишь вероятность реализации той или иной схемы распада.

В современной картине мира *случайность* стала принципиально важным атрибутом. *Она выступает здесь в диалектической взаимосвязи с необходимостью, что и предопределяет фундаментальность вероятностных закономерностей.* Господство вероятности в современной картине мира подчеркивает её *диалектичность*.

Физический вакуум. Как уже отмечалось, фундаментальные бозоны представляют возбуждения силовых полей. Предположим теперь, что все поля находятся в невозбуждённом (основном) состоянии. Это и есть *физический вакуум*. В прежних картинах мира вакуум рассматривался как пустота, её мог заполнять невесомый таинственный эфир. В современной картине вакуум — не пустота в обычном смысле, а основное состояние физических полей, он «заполнен» *виртуальными частицами*.

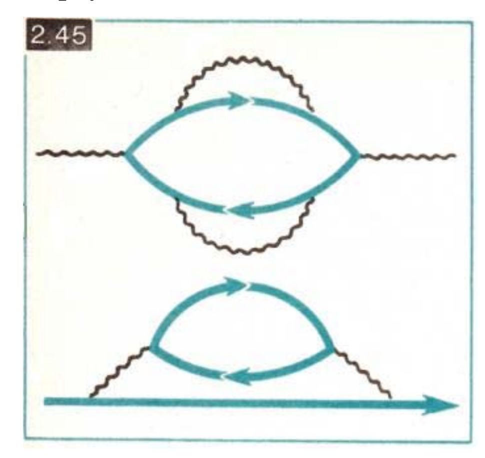
Что такое виртуальная частица? Это понятие тесно связано с соотношением неопределённостей для энергии и времени. Виртуальная частица принципиально отличается от

частицы, которую можно наблюдать в эксперименте. Она существует малое время Δt — настолько малое, чтобы определяемая соотношением неопределённостей энергия $\Delta E \approx h / \Delta t$ оказалась достаточной для «рождения» массы, равной массе виртуальной частицы. Таким образом, возникновение виртуальной частицы не требует специальных затрат энергии. Эти частицы рождаются как бы сами по себе, с тем чтобы вскоре исчезнуть. Физический вакуум как раз и представляет собой пространство, в котором рождаются и уничтожаются мириады виртуальных частиц. Можно сказать, что он обладает какой-то энергией (соответствующей основному энергетическому состоянию полей), которая всё время перераспределяется между виртуальными частицами. Однако воспользоваться энергией вакуума мы, естественно, не можем — ведь это есть *наинизшее* энергетическое состояние полей. При наличии внешнего источника энергии можно реализовать *возбуждённые* состояния полей — тогда будут наблюдаться обычные (не виртуальные) частицы.



Обычный электрон можно представить как бы окружённым «облаком» виртуальных фотонов. Обычный фотон движется «в сопровождении» виртуальных электронно-позитронных пар. На рисунке 2.43 приведены две диаграммы, на которых условно изображены виртуальный фотон (слева) и виртуальная электронно-позитронная пара (справа); фотон изображён волнистой линией. Подобные диаграммы называют фейнмановскими — по имени известного американского физика Р. Фейнмана (1918 – 1988), который ввёл их в употребление. На всех этих диаграммах линии — это частицы; линии, соединяющие какие-либо две вершины диаграммы, «изображают» виртуальные частицы (вершина диаграммы — точка где сходятся три линии).

Рассеяние электрона на электроне можно рассматривать как обмен виртуальным фотоном — одним или несколькими (рис. 2.44). На приводившемся ранее рисунке 2.37 протон и нейтрон обменивались виртуальными пионами.



Виртуальные частицы рождаются не только обычными частицами, но также другими виртуальными частицами (рис. 2.45) Благодаря этому «пустое» пространство и превращается в физический вакуум. Но насколько всё же реальны изображённые на рисунке 2.45 виртуальные композиции? Их реальность подтверждена наблюдаемым на опыте явлением поляризации вакуума. Ведь если между двумя обычными электрическими зарядами находится не просто пустое пространство, а пространство с виртуальными заряженными частицами, то в этом случае должна происходить некоторая экранизация кулоновского взаи-

модействия. Опыт подтвердил наличие такой экранизации.

Общие замечания о современной естественнонаучной картине мира. Важно подчеркнуть, что в отличие от предыдущих картин мира современная естественнонаучная картина рассматривает мир *на существенно более глубоком, более фундаментальном уровне*. Атомистическая концепция присутствовала во всех прежних картинах; однако только теперь удалось создать теорию атома, позволившую объяснить периодическую систему химических элементов, образование различных видов химических связей, многочисленные физические и химические явления. Современная картина раскрыла мир микроявлений, исследовала необычные свойства микрообъектов и в результате самым радикальным образом воздействовала на вырабатывавшиеся веками представления, заставив пересмотреть их и во многих случаях решительно порвать с традиционными взглядами и подходами.

Все прежние картины мира страдали своей *метафизичностью*; они исходили из чёткого разграничения всех исследуемых сущностей, стабильности, статичности. Сначала они преувеличивали роль механических движений, механических законов, а затем электромагнитных явлений, пытаясь в одном случае свести все законы природы к механике, а в другом — к электромагнетизму. Такая ориентация на крайности, на чёткие и безусловные разграничения, на законченность метафизична по самой своей сути. Современная естественнонаучная картина мира решительно порывает с подобной ориентацией. В её основе буйство взаимопревращений, игра случая, многообразие явлений. Основанная на вероятностных законах, современная картина мира *диалектична*; естественно, что она значительно точнее, чем прежние картины, отражает диалектически противоречивую действительность.

В связи с этим следует особо выделить ещё одно принципиальное отличие современной картины от прежних. Раньше рассматривались *раздельно* — вещество, поле, вакуум (пустой или с эфиром). В современной картине как вещество, так и поле состоят из элементарных частиц, а частицы взаимодействуют друг с другом, взаимопревращаются. Более того, вакуум тоже «состоит» из частиц (виртуальных частиц), которые взаимодействуют как друг с другом, так и с обычными частицами. Таким образом, исчезают фактически границы между веществом и полем и даже между вакуумом, с одной стороны, и веществом и полем — с другой. *На фундаментальном уровне все грани в природе действительно оказываются условными*.

Здесь нельзя не вспомнить знаменитое ленинское замечание: «...Все грани в природе условны, относительны, подвижны, выражают приближение нашего ума к познанию материи» [4, с. 298]. Современная картина мира как нельзя лучше иллюстрирует эту мысль. Если раньше речь шла действительно о *физических* картинах мира, то теперь для картины мира характеристика «физическая была бы слишком узкой. В этой картине физика тесно объединяется с другими естественными науками — она фактически сливается с химией и выступает в теснейшем союзе с биологией; недаром современную картину мира характеризуют как «естественнонаучную». Для неё характерно стирание всех и всяческих граней. Здесь *время и пространство* выступают как единый пространственно-временное континуум, *масса и энергия* взаимосвязаны, *волновое и корпускулярное движения* в известном смысле объединяются, характеризуя один и тот же объект, наконец, *вещество и поле* взаимопревращаются. Исчезают границы между традиционными разделами внутри самой физики; даже такие, казалось бы, далёкие друг от друга разделы, как астрофизика и физика элементарных частиц, оказываются взаимосвязанными столь сильно, что приходится говорить о подлинной революции в космологии.

Учение о Вселенной (*космология*) — один из важнейших элементтов любой картины мира. В современной картине мира космология занимает особое место — она не просто описывает устройство Вселенной, а рассматривает Вселенную *в её развитии*.

Современная космология. В 1922 г. А. А. Фридман нашёл решение уравнений общей теории относительности А. Эйнштейна; оказалось, что решение является нестацио-

нарным — Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. В 1929 г. Э. Хаббл обнаружил разбегание галактик (по красному смещению в их спектрах), что свидетельствовало о расширении Вселенной. Обращая мысленно вспять картину расширения Вселенной, учёные пришли к выводу, что примерно 20 млрд. лет назад Вселенная была заключена в сколь угодно малом объёме и имела сколь угодно большую плотность; в результате *Большого взрыва* она начала расширяться, иначе говоря, начала существовать. Учёным удалось проследить за развитием расширяющейся Вселенной с малых долей первой секунды после момента Большого взрыва (см., например, [16]). Но мы не знаем ни причин, вызвавших взрыв, ни того, что было до него. В 1965 г. было обнаружено так называемое *реликтовое излучение*, являющееся наглядными следами событий, связанных с Большим взрывом (так называют космическое микроволновое излучение).

Выступая в 1982 г. на XVIII Генеральной ассамблее Международного астрономического союза, академик Я. Б. Зельдович (1914 – 1988) говорил: «Поистине необходима смелость, чтобы представить себе начальное состояние Вселенной, сжатой в точку, и оставаться верным физическим законам, ведущим к такой, казалось бы, абсурдной картине... Теория Большого взрыва в настоящий момент не имеет сколько-нибудь заметных недостатков. Я бы даже сказал, что она столь же надёжно установлена и верна, сколь верно то, что Земля вращается вокруг Солнца» [48, с. 12].

В эволюции Вселенной от момента Большого взрыва до наших дней выделяют три периода: *первую секунду, первый миллион лет* и *всё остальное время*, составляющее примерно 20 млрд. лет.

Первый период называют «очень-очень ранней Вселенной». Это необычайно плотная и горячая Вселенная. Моменту, равному одной сотой секунды от момента Большого взрыва, соответствовала температура 10^{11} K; в конце первой секунды температура снизилась до 10^{10} K. Конечно, ни о каких атомах и ядрах говорить при этом не приходится — вся материя существовала тогда в виде высокоэнергетичных частиц (электронов, позитронов, нейтрино, протонов, нейтронов) и их античастиц, а также фотонов; всё это образовывало своеобразный «космический суп» плотностью в миллиарды раз больше плотности воды. В первые мгновения существования Вселенной в ней было почти поровну частиц и античастиц, с равной вероятностью шли процессы рождения пар и их аннигиляции. Но уже к концу первой секунды из-за остывания Вселенной начинают преобладать процессы аннигиляции. Если бы с самого начала частиц и античастиц было в точности поровну, то вследствие аннигиляции во Вселенной, в конечном счёте, не осталось бы ничего, кроме фотонов и нейтрино. К счастью, исходное равенство частиц и античастиц было не совсем точным: на 100 000 000 частиц приходилось 99 999 999 античастиц. Благодаря этому ничтожно малому несовпадению во Вселенной, кроме фотонов и нейтрино, существует также вещество. То самое вещество, из которого построены галактики, звёзды, планеты и мы сами.

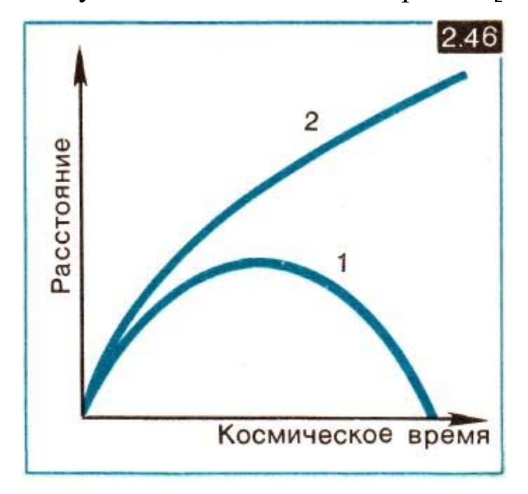
Следующий период — эра плазмы — охватывает, как уже было сказано, примерно первый миллион лет. Особого внимания заслуживают в этом периоде несколько первых минут. В течение этих минут шёл процесс образования самых лёгких атомных ядер — дейтерия и гелия. По прошествии пяти минут температура упала настолько, что реакции ядерного синтеза временно прекратились; ядра остальных элементов возникнут значительно позднее. В конце данного периода, т. е. через миллион лет после Большого взрыва, температура Вселенной снизилась до 3000 K и возникли условия, благоприятные для образования атомов водорода; начался третий период.

Третий период называют эрой «прозрачной Вселенной». В начале этого периода произошло *разделение вещества и излучения*. Вместо плазмы Вселенную теперь заполняло гигантское облако газа, состоящего из атомов водорода и гелия; плотность облака составляла в начале периода примерно 10^{-21} г/см^3. Дальнейшие события хорошо описаны в статье «Такая замечательная Вселенная»: «После образования облака из атомов водорода и гелия во Вселенной начинают формироваться галактики и звёзды. Под действием сил тя-

готения вещество собирается в сгустки. При сжатии этих сгустков температура повышается и снова приближается к 10^7 К. Снова становятся возможными термоядерные реакции. Благодаря энергии, выделяющейся в этих реакциях, сила давления в недрах звезды повышается настолько, что уравновешивает силу тяжести. Дальнейшее сжатие звезды прекращается, и устанавливается равновесие. В этом равновесном состоянии звезда может пребывать очень долго — пока весь водород в ходе термоядерных реакций не превратится в гелий. Для звезды вроде нашего Солнца эта стадия может длиться около десяти миллиардов лет. В более массивных звёздах температура выше, и они сгорают быстрее. Но в любом случае счёт идёт на многие миллионы лет. За такой срок в недрах звёзд происходят более медленные ядерные реакции, которые не успели пройти за первые секунды в начале эволюции Вселенной. В этих реакциях образуются элементы более тяжёлые, чем гелий.

При ядерном синтезе в первые секунды цепочка реакций оборвалась на гелии, так как следующие за ним ядра с массой 5 и 8 неустойчивы. В недрах звёзд ядра более массивные, чем гелий, рождаются в более сложных реакциях. Например, углерод образуется при тройных соударениях: ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \to {}^{12}\text{C} + 7,7\ \text{МэВ}$. В этой реакции выделяется избыток энергии 7,7 МэВ. Вероятность такого синтеза и, следовательно, распространённость углерода во Вселенной была бы очень мала, если бы ядро ${}^{12}\text{C}$ не имело резонансного уровня как раз с энергией 7,7 МэВ. Благодаря этому избыточная энергия поглощается, вновь возникшее ядро делается устойчивым, а вероятность реакции образования углерода из гелия сильно повышается. При столкновении ядер углерода с ядрами водорода и гелия в звёздных недрах синтезируются всё более тяжёлые ядра — вплоть до железа. Ещё более тяжёлые элементы рождаются при взрывах массивных звёзд, известных как вспышки «сверхновых».

Время жизни массивных звёзд не очень велико — десятки миллионов лет. Поэтому те из них, что образовались в первый миллиард лет истории Вселенной, уже давно закончили свой путь, обогатив мир тяжёлыми элементами. Солнце и планеты, в том числе и наша Земля, сформировались уже значительно позже из вещества, оставшегося от массивных звёзд первого поколения. Происходило это около пяти миллиардов лет тому назад, или примерно 15 миллиардов лет спустя после Большого взрыва» [23, с. 28].



Итак, историю Вселенной от первой секунды её существования до нашего времени учёные представляют сегодня достаточно ясно. А что ожидает Вселенную в будущем? Её расширение происходит с постепенно уменьшающейся скоростью. В любом случае ещё один-два десятка миллиардов лет Вселенная будет продолжать расширяться. Дальнейшая её судьба зависит от того, какова средняя космическая плотность, окажется ли она достаточной, чтобы силы тяготения заставили Вселенную начать сжиматься. Подсчитано, что если средняя плотность вещества в нынешней Вселенной превысит критическое значение, равное $2 \cdot 10^{-29}$ г/см^3, то силы тяготения смогут в дальнейшем остановить процесс расширения — Вселенная начнёт сжиматься с постепенно увеличивающейся скоростью. Сжатие

Вселенной будет длиться примерно столько же времени, сколько длилось расширение, и завершится сжатием её в «точку» с бесконечно высокой плотностью. Если же средняя космическая плотность окажется ниже критической, Вселенная будет расширяться вечно. В первом случае говорят о *закрытой* модели Вселенной, а во втором — об *открытой*. На рисунке 2.46 показана зависимость радиуса Вселенной от времени для обеих моделей.

В настоящее время неясно, какая модель соответствует действительности. Имеются данные, что средняя космическая плотность около 10^{-30} г/см^3; это меньше критического значения. Но в действительности плотность должна быть выше за счёт метагалактического ионизированного водорода, погасших звёзд и, возможно, нейтрино (если окажется, что нейтрино имеют отличную от нуля массу покоя). Масса нейтрино и судьба Вселенной оказались на чашах весов!

Смена естественнонаучной традиции. Заканчивая рассказ о современной картине мира, отметим ещё одно принципиальное обстоятельство. Все прежние картины мира создавались как бы *извне* — исследователь изучал окружающий мир отстранённо, вне связи с собой, в полной уверенности, что можно исследовать явления, не нарушая их течения. Такова была веками закреплявшаяся естественнонаучная традиция. «В науке прошлого, — пишет академик Н. Н. Моисеев, — с её стремлением к прозрачным и ясным схемам, с её глубокой убеждённостью, что мир в своей основе достаточно прост, человек превратился в стороннего наблюдателя, изучающего мир «извне». Возникло странное противоречие — человек всё же существует, но существует как бы сам по себе. А космос, природа — тоже сами по себе. И объединялись они, если это можно назвать объединением; только на основе религиозных воззрений» [75, с. 79].

В процессе создания современной картины мира эта естественнонаучная традиция решительно ломается. Она сменяется принципиально иным подходом к изучению природы; теперь научная картина, мира создаётся уже не «извне», а «изнутри», *сам исследователь становится неотъемлемой частью создаваемой им картины*. Об этом хорошо сказал В. Гейзенберг: «В поле зрения современной науки прежде всего — сеть взаимоотношений человека с природой, те связи, в силу которых мы, телесные существа, представляем собой часть природы, зависящую от других её частей, и в силу которых сама природа оказывается предметом нашей мысли и действия только вместе с самим человеком. Наука уже не занимает позиции только наблюдателя природы, она осознаёт себя как частный вид взаимодействия человека с природой. Научный метод, сводившийся к изоляции, аналитическому объяснению и упорядочению, натолкнулся на свои границы. Оказалось, что его действие изменяет и преобразует предмет познания, вследствие чего сам метод уже не может быть отстранён от предмета. В результате естественнонаучная картина, мира, по существу, перестаёт быть только естественнонаучной» [32, с. 304].

Необходимость отказа от существовавшей естественнонаучной традиции, когда человек отстранялся от природы и мысленно бесконечно детально готов был её препарировать, хорошо осознавал ещё двести лет назад И. Гете (1749 – 1832) — выдающийся немецкий поэт, мыслитель и естествоиспытатель. Вспомним великолепные строки из «Фауста»:

Во всём подслушать жизнь стремясь,
Спешат явленья обездушить,
Забыв, что если в них нарушить
Одушевляющую связь,
То больше нечего и слушать.

Позднее, в середине XIX в., в России возникло умонастроение (так называемый *русский космизм*), предполагающее синтез естественнонаучной и философской мысли, рассматривавшее изучающего природу человека не просто как наблюдателя, а как участника всех происходящих в природе процессов, в том числе и процессов, происходящих в космосе. В связи с этим выделим имя И. М. Сеченова (1829 – 1905), считавшего, что человека надо изучать в единстве его психики, физиологии и окружающей среды.

Особенно ярко новый подход к исследованию природы продемонстрировал академик В. И. Вернадский (1863 – 1945) — основатель геохимии, биогеохимии, радиогеологии, мыслитель, намного опередивший своё время, создатель учения о *ноосфере — сфере Разума*. В. И. Вернадский рассматривал человека как важнейшее звено в процессе эволюции природы — он не только подвергается влиянию природных процессов, но и способен, будучи носителем разума, целенаправленно воздействовать на эти процессы. Как отмечал Н. Н. Моисеев, «учение о ноосфере оказалось как раз тем звеном, которое позволило связать картину, рождённую современной физикой, с общей панорамой развития жизни — не только биологической эволюции, но и общественного прогресса... Очень многое нам ещё неясно и скрыто от нашего взора. Тем не менее сейчас перед нами развёртывается грандиозная гипотетическая картина процесса самоорганизации материи от Большого взрыва до современного этапа, когда материя познаёт себя, когда ей становится присущ разум, способный обеспечить её целенаправленное развитие» [75, с. 81].

Примечание. Термин «ноосфера» был предложен французским исследователем Э. Леруа в 1924 г. Существуют две трактовки этого термина. Первая: ноосфера — это биосфера, находящаяся под воздействием со стороны человека. Вторая: ноосфера — это биосфера, развитие которой целенаправленно управляется человеком. Мы придерживаемся здесь второй трактовки, следуя П. Тейяр-де-Шардену и В. И. Вернадскому.

Глава третья

МЕТОДОЛОГИЧЕМСКИЕ ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ

У А. С. Пушкина есть удивительное стихотворение:

О, сколько нам открытий чудных
Готовят просвещенья дух
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг,
И случай, бог-изобретатель...

Эти строки поражают глубиной мысли. Нам видится в них поэтическое выражение некоторых принципов современной физики. Мы видим здесь намёк на метод последовательных приближений («И опыт, сын ошибок трудных»), на развитие через разрешение парадоксов, требующее неожиданных, гениальных идей («И гений, парадоксов друг»), на идею отбора информации из шума («И случай, бог-изобретатель»). Но разве мог поэт предвидеть методологию физики XX столетия? Нет, конечно. Просто он великолепно чувствовал *диалектику*. На диалектике и произошло удивительное «пересечение» поэтических откровений и методологических принципов физики.

Мы обратились к стихотворению Пушкина, чтобы подчеркнуть главную мысль: *методологические вопросы современной физики органически связаны с вопросами материалистической диалектики*. Владение методологией современной физики есть, в конечном счёте, владение диалектикой. Использование этой методологии в практике преподавания физики есть практическое обучение диалектике. Здесь нельзя не напомнить знаменитые слова В. И. Ленина: «Современная физика лежит в родах. Она рожает диалектический материализм» [4, с. 332].

Таким образом, беседа о методологии современной физики это, по сути дела, беседа о диалектике: диалектике необходимого и случайного, сохранения и изменения, единичного и общего и т. д. Начнём её с диалектики необходимого и случайного — покажем, как современная физика пришла к выводу о фундаментальности вероятностных закономерностей.

§ 12. ФУНДАМЕНТАЛЬНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

Проблема соотношения между динамическими и статистическими (вероятностными) закономерностями. Наука рассматривает два основных типа причинно-следственных связей и соответственно два типа закономерностей — *динамические* и *статистические (вероятностные)*. Первые позволяют делать предсказания абсолютно жёсткие, однозначные, а вторые — вероятностные. После того как в середине XIX в. вероятность стала использоваться в физике, возник вопрос о *соотношении* между динамическими и статистическими закономерностями.

Мы уже касались этого вопроса ранее (см., например, § 1, 2, 11 и особенно диалог «О привычке видеть за вероятностями однозначные закономерности»). Теперь проанализируем его более обстоятельно.

Первоначально данный вопрос решался в пользу примата динамических закономерно-

стей. Считалось, что статистические законы обусловлены неполнотой наших знаний, что к вероятностному описанию приходится прибегать, когда неизвестны детали картины, когда трудно или нельзя точно учесть все данные, все взаимодействия. Такую концепцию назовём *концепцией неполноты знаний* или, лучше, *концепцией примата динамических законов*. Фактически она предполагала, что за статистическими законами обязательно «скрываются» динамические, что в основе всего лежат именно динамические законы, которые как раз и выражают объективные причинно-следственные связи. В одних случаях мы используем эти законы, в других же оказываемся не в состоянии этого сделать; тогда и выходят на сцену вероятностные законы.

Согласно данной концепции, поведение газа могло бы быть описано не вероятностно, а совершенно однозначно, если бы мы смогли задать начальные состояния всех молекул в этом газе и учесть все столкновения молекул. Тогда газовые законы были бы получены как следствие динамических законов классической механики Ньютона, применённых к отдельным молекулам. Однако из-за слишком большого числа молекул мы практически не можем проследить за поведением каждой из них, и поэтому приходится пользоваться вероятностными законами статистической механики. (Напомним читателю, что такая точка зрения подвергалась критике в упомянутом выше диалоге).

Когда обнаружилось, что вероятностное поведение присуще не только большому коллективу, но и *отдельным* атомам и молекулам (это продемонстрировала квантовая механика), сторонники рассматриваемой концепции предположили наличие неких «скрытых параметров», которые подчиняются динамическим законам и описывают поведение атома или молекулы на более глубоком уровне. В настоящее время поиск «скрытых параметров» в квантовой механике фактически прекращён.

В рамках концепции примата динамических закономерностей причинность связывается, по сути дела, только с этими закономерностями. Случайность рассматривается только в *субъективном* плане (неполнота наших знаний); *объективная* случайность отождествляется попросту с *отсутствием причинности*. Показательно, что вместо терминов «динамические» и «статистические» нередко употребляются термины «причинные» и «случайные»; тем самым причинность противопоставляется случайности — либо причинность, либо случайность. Недаром вероятностное поведение микрообъектов определённое время рассматривали как результат *нарушения* принципа причинности в квантовой механике.

Концепция примата динамических закономерностей оказалась весьма живучей. Это объясняется рядом причин. Во-первых, статистические физические теории возникли позднее динамических и, как казалось, на базе последних. Так, статистическая механика имеет в качестве своего «динамического аналога» классическую механику, а микроскопическая электродинамика — классическую электродинамику. Во-вторых, представлялось (да и сегодня представляется многим), что однозначные предсказания, получаемые в динамических теориях, в большей мере, чем вероятностные, отвечают самому духу «точной науки». В-третьих, для понимания принципиальной роли статистических законов требуется *владением диалектикой*, рассмотрение таких диалектических категорий, как необходимое и случайное, возможное и действительное. Именно недиалектическое понимание этих категорий и есть та основная, на наш взгляд, причина, которая объясняет принижение и даже отрицание принципиальной роли статистических законов.

В этой связи отметим так называемую *концепцию равноправия*. В отличие от предыдущей концепции, она не утверждает примата динамических закономерностей. Она исходит из того, что динамические и статистические закономерности в определённом смысле равноправны — они играют одинаково важную роль, но в разных областях: законы поведения индивидуальных объектов динамические, а законы поведения больших коллективов статистические. Согласно такой концепции, при переходе, например, от изучения движения отдельной молекулы к изучению газа динамические законы должны переходить в статистические. Как писал советский философ М. Э. Омельяновский, «динамическая и стати-

стическая закономерности — формы необходимого, существенного отношения явлений природы — не только связаны с переходами одна в другую, но едины в противоположности» [99, с. 394]. Он считал, что признание примата динамических закономерностей «так же неверно, как признание первичности статистических законов» [99, с. 405].

Концепция равноправия может показаться более прогрессивной по сравнению с концепцией примата динамических закономерностей. Однако она также представляется сегодня неправомерной. Серьёзный удар по этой концепции нанесла квантовая механика, показавшая, что для проявления статистических закономерностей необязательно наличие коллектива объектов — *даже отдельный объект может описываться этими закономерностями*. Несостоятельность концепции равноправия объясняется произволом, допущенным здесь при выборе категорий диалектики. Нельзя такие понятия, как динамические и статистические законы, относить к категориям, единым в противоположности. Указанные понятия не являются диалектическими категориями. В качестве таких категорий следует рассматривать необходимое и случайное, возможное и действительное.

Рассматривая проблему соотношения между динамическими и статистическими закономерностями, современная наука исходит из *концепции примата статистических закономерностей*. Не только динамические, но и статистические законы выражают объективные причинно-следственные связи. Более того, именно статистические закономерности являются *фундаментальными*; по сравнению с динамическими закономерностями они *глубже* выражают указанные связи. Современную концепцию можно сформулировать так: «Динамические законы представляют собой первый, низший этап в процессе познания окружающего нас мира; статистические законы более совершенно отображают объективные связи в природе: они являются следующим, более высоким этапом познания» [81, с. 141].

Перейдем к аргументации сформулированной концепции.

От динамических физических теорий к статистическим. Все фундаментальные физические теории можно разделить на две группы — *динамические* и *статистические теории*. В динамических теориях величины подчиняются однозначным (динамическим) закономерностям; статистические теории основаны на вероятностных (статистических) закономерностях.

К динамическим теориям относятся *классическая механика* (она была создана в XVII – XVIII вв.), *механика сплошных сред*, т. е. гидродинамика (XVIII в.) и теория упругости (начало XIX в.), *феноменологическая термодинамика* (XIX в.), *классическая электродинамика*, включая волновую оптику (XIX в.), *специальная* и *общая теория относительности* (начало XX в.). В этих теориях состояние физического объекта (системы) однозначно определяется заданием точных значений тех или иных величин. В классической механике, например, состояние системы задаётся значениями координат и проекций скоростей частиц. В механике сплошных сред вместо набора координат и скоростей частиц используют функции, описывающие распределение в пространстве определённых величин — плотности, давления, скорости и др. В термодинамике состояние системы описывают термодинамические параметры — объём, температура, давление и др. В электродинамике рассматриваются напряжённости и индукции электрического и магнитного полей. Во всех динамических теориях величины, определяющие состояние системы, являются непрерывными функциями пространственных координат и времени. Существенно, что знание значений этих величин в начальный момент времени позволяет, в принципе, однозначно определить значения величин в любой последующий момент.

Почти все фундаментальные динамические теории были созданы в XVIII – XIX вв.; с ними связано становление физики как науки, охватывающей широкий круг явлений — механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических. Из динамических теорий лишь теория относительности создана в XX в. После её создания в самом начале века победное шествие динамических теорий прекратилось — с тех пор новых динамических теорий не появилось. «Теория гравитации Эйнштейна — это последний триумф динамических закономерностей» [81, с. 33].

Иное дело статистические теории. Впервые вероятность была использована в физике в середине XIX в. (Максвелл, 1859 г.). Именно тогда и появились впервые термины «динамическая теория» и «статистическая теория». Ввёл их Максвелл; в докладе Кембриджскому философскому обществу он писал: «Я считаю, что наиболее важное значение для развития наших методов мышления молекулярные теории имеют потому, что они заставляют делать различие между двумя видами познания, которые мы можем назвать динамическим и статистическим» [81, с. 36].

Первая статистическая физическая теория — *статистическая механика* — возникла во второй половине XIX в. на основе фундаментальных работ Максвелла и Больцмана. Вскоре обнаружилось, что применение этой теории к тепловым процессам позволяет объяснить важнейшие положения феноменологической термодинамики и прежде всего второе начало термодинамики. Тем не менее статистическая механика с большим трудом завоёвывала сторонников — слишком сильна была всеобщая приверженность к «точным» динамическим теориям. Окончательно она завоевала признание в начале нашего столетия, когда А. Эйнштейн и М. Смолуховский (1872 – 1917) создали теорию броуновского движения (1905). Здесь важно подчеркнуть два момента. Первый: броуновское движение явилось первым подробно исследованным явлением, связанным с флуктуациями. Второй: на примере броуновского движения было показано, что статистические законы могут применяться не только к коллективам частиц, но и к отдельным частицам.

На рубеже XIX и XX вв. Лоренц заложил основы электронной теории вещества — *микроскопической электродинамики*. Это означало, что статистические методы начали распространяться на электрические и магнитные явления. В основе статистической механики лежало предположение, что вещество имеет дискретную структуру — состоит из молекул (во второй половине XIX в. это предположение было далеко не общепризнанным); микроскопическая электродинамика основывалась на предположении о дискретности электрических зарядов. В рамках микроскопической электродинамики объединились учения о теплоте и электромагнетизме. Это позволило П. Ланжевену (1872 – 1946) построить в 1905 г. теорию парамагнетизма вещества. В 1910 г. Эйнштейн создал теорию рассеяния света на микроскопических неоднородностях среды, обусловленных флуктуациями её плотности; тем самым получили объяснение голубой цвет неба и красный цвет заходящего солнца.

Во второй главе книги было уделено много внимания возникновению и становлению (в первой трети XX в.) *квантовой механики*; подробно обсуждался принципиально вероятностный характер этой теории. Ещё раз подчеркнём, что в микромире вероятность играет принципиальную роль — она характеризует поведение отдельной частицы. Квантовая механика явилась *решающим аргументом* в пользу фундаментальности статистических закономерностей. Именно в это время и возникла современная концепция, утверждающая примат статистических закономерностей. Её выдвинули Бор, Гейзенберг, Борн, Ланжевен и др.

Отметим, что все статистические теории отличаются от динамических прежде всего содержанием понятия состояния системы. В отличие от динамических, в статистических теориях состояние задаётся не значениями физических величин, а *законами распределения*, которые дают *вероятности* того, что рассматриваемые величины принимают те или иные значения. Сами же величины являются *случайными* — они не принимают определённых значений в заданных условиях.

«Начиная с 20-х годов XX века, после создания нерелятивистской квантовой механики, всё дальнейшее развитие физики микромира шло под флагом квантовых теорий статистического характера... Победное шествие статистических законов, начавшееся во второй половине XIX века, привело к тому, что динамические законы совершенно утратили былое значение основного, а порой и единственного метода исследования фундаментальных процессов природы» [81, с. 66]. Из фундаментальных статистических теорий, выросших на «почве» квантовой механики, отметим *квантовую электродинамику, теорию слабых*

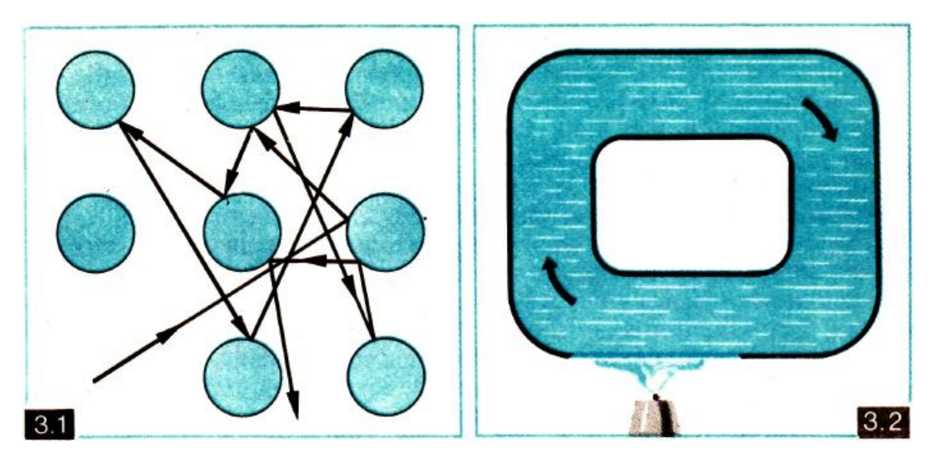
взаимодействий, квантовую хромодинамику. Все эти теории показали, что вероятностные законы управляют не только значениями тех или иных *физических величин* (координат, импульса, энергии и т. д.), но и самими *числами частиц*, что на уровне микроявлений сам факт существования материи в той или иной форме определяется вероятностными законами. Особого внимания заслуживает тот факт, что в современной физике физический вакуум рассматривается не как пустота, а как пространство, «наполненное» случайно возникающими и исчезающими виртуальными частицами (см. § 11).

Последняя фундаментальная динамическая теория (теория относительности) была создана в самом начале XX в. Первая статистическая теория (статистическая механика) возникла во второй половине XIX в. В целом XIX столетие — это столетие динамических теорий; наше столетие — это парад статистических теорий. *Более глубокое проникновение в сущность материи потребовало,* как мы видим, *перехода от динамических теорий к статистическим.* Некоторые из статистических теорий возникли как своеобразные аналоги созданных ранее динамических теорий; можно сказать, что они создавались на базе соответствующих динамических теорий (статистическая механика на базе классической, микроскопическая электродинамика на базе электродинамики Максвелла). Однако большинство статистических теорий с самого начала развивались как именно статистические; для них аналогия с динамическими теориями в принципе невозможна. Такими являются квантовая механика, квантовая электродинамика, теория слабых взаимодействий, квантовая хромодинамика.

Итак, даже самый общий взгляд на историю возникновения фундаментальных физических теорий позволяет сделать вывод, что *динамические теории соответствовали первому этапу в процессе познания природы человеком, тогда как на следующем этапе главную роль стали играть статистические теории.* Уже отсюда видно, что вероятностные закономерности являются *более глубокими, более фундаментальными* по сравнению с динамическими и что попытки искать «скрывающиеся» за статистическими законами однозначные связи заведомо обречены на неудачу.

Случайность в поведении простых динамических систем. Всегда считалось очевидным, что простые системы, описываемые динамическими теориями, должны, вести себя жёстко детерминированно, что при рассмотрении таких систем нет никакой необходимости обращаться к вероятностям. Как оказалось, такая точка зрения не совсем верна. Оказалось, что вероятности обнаруживают себя даже там, где царствуют однозначные причинно-следственные связи. Они обнаруживаются, например, в поведении весьма простых динамических систем, описываемых в рамках классической механики или гидродинамики. «Обнаружение и понимание того факта; что хаотическое, случайное поведение возможно даже в очень простых динамических системах, явилось замечательным открытием современной науки» [26, с. 54 – 55].

За счёт чего же, спрашивается, возникает случайность в поведении простой динамической системы? Это связано с *неустойчивостью* движения системы. *Неустойчивая динамическая система оказывается, по сути дела, системой статистической.* Примером может служить система шаров, испытывающих упругие столкновения; ничтожное изменение траектории шара приводит к существенному изменению всей картины. Рассмотрим для простоты двумерную ситуацию: имеется упорядоченная конфигурация кружков (кружок — двумерный образ шара), внутри которой движется «частица», испытывающая упругие столкновения с кружками. Одна из возможных траекторий частицы показана на рисунке 3.1. Будем писать 1, если отражение произошло от левой половины кружка, и 0 — если от правой; тогда последовательность изображённых на рисунке отражений можно записать в виде следующей последовательности из единиц и нулей: 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0. Эта последовательность является «случайной» — здесь нет корреляции между появлением следующих друг за другом цифр. Малейшее изменение исходного направления движения частицы коренным образом меняет картину — реализуется новая траектория, которой отвечает новая «случайная» последовательность из единиц и нулей.



Рассмотрим ещё один пример. Согнутая кольцом и полностью заполненная водой металлическая трубка подогревается снизу и охлаждается сверху (рис. 3.2). В трубке происходит конвекция, вода циркулирует по трубке (на рисунке эта циркуляция совершается по часовой стрелке). Казалось бы, всё очень просто. Однако, как показывает опыт, если сделать достаточно большой разность температур нижней и верхней частей кольца, вода начинает случайным образом менять направление вращения. Это можно пояснить так. Пусть вначале вода циркулировала по часовой стрелке — в левой части кольца поднималась, а в правой опускалась. При сильном подогреве снизу и охлаждении вверху вода в левой части кольца начинает подниматься быстрее и, значит, ускоряется весь процесс циркуляции воды в трубке. Из-за этого объём воды, остывшей вверху, может, опускаясь по правой стороне кольца, проскочить горячее основание, не успев нагреться. Не нагревшись, он затем не сможет подняться по левой стороне кольца до верхней точки. При этом вода, опускающаяся по правой стороне, оказывается теплее поднимающейся по левой. В итоге вращение водяного кольца приостанавливается и затем начинается в обратную сторону. Таким образом, водяное кольцо раскручивается то в одну сторону, то в другую; ситуация оказывается весьма неустойчивой — малейшие детали вызывают смену направления вращения, эта смена происходит случайным образом.

Примеры простых динамических систем, оказывающихся неустойчивыми и потому статистическими, приводятся, например, в цитированной ранее работе А. В. Гапонова-Грехова и М. И. Рабиновича. Их можно найти также в статье Я. Г. Синая «Случайность неслучайного». В конце этой статьи говорится: «Непосредственный вывод из сказанного состоит в том, что для применимости законов теории вероятностей вовсе не обязательно иметь дополнительный внешний случайный механизм. Статистические закономерности оказываются часто результатом проявления определённых свойств детерминированной динамики. Одним из таких свойств является свойство неустойчивости движения. Чем движение неустойчивее, тем устойчивее проявляются статистические закономерности. Неустойчивость неслучайной динамики ведёт к случайности» [110, с. 80]. Хотелось бы к этому добавить, что недаром при выведении космических аппаратов на орбиту приходится осуществлять коррекции их движения, чтобы предотвратить случайное отклонение от расчётной траектории.

Вероятностное поведение простых динамических систем — веский аргумент в пользу фундаментальности статистических закономерностей. Но можно пойти ещё дальше — показать, что динамические теории отнюдь *не противостоят статистическим*, а включаются в рамки последних как *предельный* случай (поэтому и нельзя рассматривать динамические и статистические законы как диалектические категории). Это хорошо видно на примере классической механики, которую можно рассматривать как предельный случай квантовой механики.

Классическая механика как статистическая теория. Одним из основных принципов классической механики является *принцип наименьшего действия.* Его можно сформулировать так: из всевозможных траекторий между начальной и конечной точками тело

«выбирает» такую, для которой минимальна величина, называемая *действием* (эта величина равна разности кинетической и потенциальной энергий тела, проинтегрированной по всему времени движения от начальной точки до конечной). Впервые этот принцип сформулировал в 1740 г. П. Мопертюи (1698 – 1759); он полагал, что данный принцип выражает мудрость творца, который устроил Вселенную весьма целесообразно — на основе максимальной экономии действия. С телеологическим толкованием принципа наименьшего действия было по-настоящему покончено лишь через двести лет, после того как в 1948 г. Р. Фейнман построил квантовую механику, используя *интегралы по траекториям* (см., например, [133]). Стало ясно, что принцип наименьшего действия — это *принцип максимальной вероятности*. Тело не «выбирает» классическую траекторию; просто это есть *наиболее вероятная* из всех возможный траекторий.

Рассмотрим вкратце фейнмановский подход. Пусть в момент t_1 частица находится в точке *1*. Какова вероятность $w(1 \to 2)$ того, что в момент t_2 частица окажется в точке *2*? Для этого надо учесть *все возможные* траектории, из *1* в *2* и суммировать амплитуды вероятностей перехода, отвечающие разным траекториям. Таким образом,

$$w(1 \to 2) = |\sum_j \psi_j(1 \to 2)|^2 \qquad (1)$$

Здесь, $\psi_j(1 \to 2)$ — амплитуда вероятности перехода из *1* в *2* по *j*-й траектории. Подчеркнём, что складываются не вероятности, а амплитуды вероятностей; результирующая вероятность есть квадрат модуля суммарной амплитуды. Для амплитуды ψ_j справедливо выражение

$$\psi_j \sim e^{\frac{2\pi i S_j}{h}} \qquad (2)$$

где $S_j(1 \to 2)$ — действие для *j*-й траектории, h — постоянная Планка. Итак, с точки зрения квантовой механики движение частицы из одной точки в другую описывается как своеобразная *суперпозиция* по множеству всевозможных траекторий. В предельном случае, когда $S_j \gg h$, приходим к классической механике. В этом случае суммарный вклад (сумма амплитуд) различных траекторий в вероятность перехода из *1* в *2* оказывается равным нулю — за исключением вклада одной траектории, которая и становится классической траекторией частицы. Это есть траектория, для которой действие принимает наименьшее значение. «Итак, нам лишь кажется, что природа выбирает однозначный классический путь. На самом деле участвуют все возможные пути и справедлив статистический закон. Классическая траектория просто наиболее вероятна; она осуществляется в качестве единственной только при условии $S \gg h$. Фундаментальный динамический принцип — принцип наименьшего действия — имеет, по существу, статистическую природу. Сказанное относится не только к механике. Так, динамические законы геометрической оптики (например, в форме вариационного принципа Ферма) устанавливают единственную траекторию светового луча, соединяющую две любые точки пространства. Но эта единственная траектория в действительности оказывается лишь наиболее вероятной из бесчисленного множества других возможных траекторий» [81, с. 159 – 160].

Обратим внимание на то, что телеологическому толкованию принципа наименьшего действия *противостоит* его вероятностное объяснение. Фактически мы встречаемся здесь с исключительно важным, принципиальным противостоянием: *либо бог, либо случай* (вспомним у Пушкина: «И случай, бог-изобретатель»). В действительности тело не «выбирает» никакой траектории; «выбранная» траектория — это *наиболее вероятная* траектория. Точно так же тело не «стремится» в состояние, где его энергия минимальна (речь идёт о часто встречающемся в книгах «принципе минимума энергии»); просто состояние с наименьшей энергией оказывается *наиболее вероятным*.

Итак, можно говорить о всеобщности, универсальности вероятностного подхода. Это означает, в частности, что деление фундаментальных теорий на динамические и статистические является, строго говоря, условным. Фактически все фундаментальные теории *должны рассматриваться как статистические*. Так, классическую механику с полным основанием следует считать статистической теорией, коль скоро лежащий в её основе принцип наименьшего действия имеет вероятностную природу. Конечно, классическую механику можно сформулировать, не прибегая к вероятностям; однако вероятностное описание в данном случае не только возможно, более того, именно оно отвечает более глубокому уровню рассмотрения теории. Заметим, что в отличие от классической квантовую механику в любом случае надо рассматривать на языке вероятностей. Правда, главное различие между этими механиками заключается в другом (в конечном счете, обе механики описываются на языке вероятностей) — дело в том, что *в квантовой механизм первичной величиной является не сама вероятность, а амплитуда вероятности (волновая функция)*, что здесь есть специфическое явление *интерференции амплитуд*, не имеющее аналога в классической механике. Иными словами, главное различие между квантовой механикой и классической состоит не в том, используется или не используется вероятность (она используется в обеих теориях), а в различии правил работы с вероятностями. Мы подробно говорили об этом в § 8. Там же было показано, что дифракция микрообъектов, например электронов, более глубоко объясняется на основе интерференции амплитуд вероятностей, нежели на языке волн, характерном для динамических теорий.

Законы сохранения и вероятность. Законы сохранения занимают в физике особое место. Существует следующая точка зрения на эти законы: они представляют собой наиболее глубокие законы природы, к которым, возможно, сведётся в будущем вся физика; они являются динамическими законами, поэтому первичными следует полагать всё же не статистические, а динамические закономерности. Можно сказать, что законы сохранения — это последний бастион сторонников концепции примата динамических закономерностей. Однако и этот бастион оказывается на поверку ненадёжным. Во-первых, нельзя свести все законы природы к совокупности законов сохранения. Ведь эти законы представляют собой определённые *запреты*, налагаемые на процессы, происходящие в природе. На основе же системы запретов можно сделать много важных заключений о процессах, но нельзя сколь-либо детально рассмотреть физическую природу процессов. Во-вторых, законы сохранения вовсе не отменяют вероятностной природы процессов. Они формулируют условия, при которых *вероятность определённых процессов оказывается равной нулю*. В-третьих, не надо столь категорично полагать, что сами законы сохранения являются динамическими законами. На уровне микроявлений эти законы обнаруживают статистический характер, что проявляется в *соотношениях неопределённостей* (см. § 7). «Законы сохранения импульса и энергии строго выполняются для статистических средних и на достаточно больших пространственно-временных интервалах. Следовательно, законы сохранения важнейших механических величин имеют не динамический, а статистический характер. Точнее, динамический характер эти законы приобретают только на больших интервалах» [81, с. 206].

Вероятность в биологии. Говоря о фундаментальности вероятностных закономерностей, не следует ограничиваться рамками собственно физики. *Эти закономерности фундаментальны также в биологии*. Мы имеем в виду *закономерности случайного комбинирования генов при скрещивании* — установленные Г. Менделем (1822 – 1884) законы расщепления (первый закон Менделя) и независимого распределения генов (второй закон Менделя), а также открытые Т. Морганом (1866 – 1945) закон совместного наследования сцепленных генов и явление перекрёста хромосом. Случайные наследственные изменения связаны не только с комбинированием генов при скрещивании; они могут быть обусловлены действием внешней среды на генную структуру хромосом, а также случайными нарушениями в биологическом механизме, обеспечивающем сохранение генетической информации при делении соматических клеток и при мейозе. Эти наследственные изменения

называют *мутациями*. В целом картина мутаций обнаруживает закономерность, выражаемую *законом гомологических рядов*, открытым Н. И. Вавиловым (1887 – 1943). *Генетика — принципиально статистическая теория*; она дала строгое научное обоснование дарвиновской теории происхождения и эволюции видов, объяснила, как именно происходит наследование изменённых признаков.

Физик хорошо знает, что флуктуации величин, характеризующих макросистему, всегда очень малы. Именно поэтому макросистему можно описывать в первом приближении с помощью динамических законов, что и делается в феноменологической термодинамике. Получается, что при переходе с атомно-молекулярного уровня рассмотрения на макроуровень происходит взаимная компенсация многочисленных случайных отклонений в поведении молекул; в результате поведение макросистемы как целого оказывается однозначно предсказуемым.

Биолог имеет дело с качественно иной ситуацией. Отдельные флуктуации, характеризующие случайные изменения той или иной генетической программы, усиливаются в миллионы миллиардов раз и обнаруживаются на макроуровне — в организме-фенотипе. Никакой взаимной компенсации подобных флуктуаций здесь нет. *Отдельная флуктуация вырастает до макроразмеров*. Предположим, что в зиготу попал смутировавший ген. По мере развития данного организма происходит многократное деление клеток и в итоге ген-мутант оказывается продублированным примерно 10^{15} раз. Точно так же оказывается продублированной и реализовавшаяся в рассматриваемой зиготе случайная комбинация генов. Таким образом, в процессе становления фенотипа случайные изменения генетической программы оказываются *многократно усиленными* — они переходят с атомно-молекулярного уровня на макроуровень. На макроуровне происходит *отбор фенотипов* — уничтожаются фенотипы, которые случайно оказались неприспособленными к условиям обитания, сохраняются и дают потомство приспособленные к этим условиям фенотипы. Впрочем, испытуемым предоставляется лишний шанс. Не пригодившиеся сегодня изменения генетической программы могут пригодиться завтра. Пусть случайно возникшее изменение в течение нескольких поколений фенотипов «подремлет», замаскировавшись в рецессивном гене; вдруг оно пригодится в дальнейшем.

Из сказанного следует, что процесс эволюции в живой природе является *принципиально непредсказуемым* в том смысле, что нельзя предвидеть возникновение того или иного конкретного вида. Иначе говоря, любой вид есть явление *случайного* характера. Можно уничтожить вид, можно создать какой-нибудь новый вид, но нельзя восстановить исчезнувший вид. В этом смысле *любой из существующих ныне видов уникален.*

Генетика и эволюционная теория особенно ярко демонстрируют *фундаментальность* вероятностных закономерностей в биологии, здесь отчётливо проявляется *принципиальная роль случайностей* [120]. Но этим тема «Вероятность в биологии» далеко не исчерпывается. Она включает в себя такие важные проблемы, как возникновение жизни на Земле, изменение численности популяций, моделирование процессов в нервной системе, создание модели человеческого мозга и др.

Заметим, что попытки моделировать работу мозга в рамках хотя бы проблемы распознавания образов были неудачными, пока рассматривались только жёсткие, однозначные связи. Решение этой проблемы было получено при использовании вероятностного подхода, позволившего создать кибернетическое устройство — персептрон, — в саму конструкцию которого заложены связи, организованные случайным образом [120]. Сегодня уже нет сомнений в том, что любая реалистическая модель мозга должна быть стохастической, т. е. должна основываться на вероятностных закономерностях.

Диалог. О формировании у школьников правильного отношения к случайному



Автор. Приходилось ли Вам обсуждать с учащимися проблему случайного, оценивать *роль случая* в природе и человеческой практике?

Учитель. Не приходилось. В этом просто не было нужды — ведь в наших школьных программах вероятность не рассматривается.

Автор. Но если вероятностные закономерности фундаментальны, то, очевидно, роль случайностей достаточно *принципиальна*. Наверное, сегодня уже непозволительно отмахиваться от случайности, как от чего-то досаждающего нам?

Учитель. Мы воспитывались в духе *неприязни* к случайному. В этом смысле характерно довольно эмоциональное высказывание К. А. Тимирязева: «Что такое случай? Пустое слово, которым прикрывается невежество, уловка ленивого ума. Разве случай существует в природе? Разве он возможен? Разве возможно действие без причины?» [104, с. 3]. Готовясь к нашей беседе, я заглянул в «Краткий словарь по философии» [57] и на с. 211 прочитал: «...каждое явление формируется под влиянием не только существенных, необходимых; но и случайных, несущественных причин». Получается, что случайность — это нечто несущественное.

Автор. Я согласен, что мы привыкли видеть в случае только нечто отрицательное. Что касается «Словаря», то просто здесь не совсем удачно сформулирована мысль. На той же странице говорится, что «случайность выступает как форма проявления необходимости». Так что не может быть речи о несущественности случайного, а заодно (если вспомнить то, что говорил Тимирязев) и о том, что случайное означает отсутствие причины.

Очевидно, что в современной школе не место устаревшим парадигмам. У современного поколения надо формировать и *современное отношение к случайному* — независимо от того, как воспитывали нас с вами. Это отношение достаточно полно сформулировано в книге «Этот случайный, случайный, случайный мир»: «До сих пор говорилось о досадной случайности, которая вносит в нашу жизнь неопределённость, неуверенность и тревогу. Но давно замечено, что кроме досадного есть ещё случай счастливый, полезный, желанный... Впервые, по-видимому, поняли пользу случайности и применили её селекционеры при искусственном выведении новых растений, новых пород скота, птиц и рыб. В последнее время случайностью стали интересоваться инженеры, сумевшие создать ряд удивительных машин, необыкновенные свойства которых получены за счёт введения в их кон-

струкцию элемента случайности. Поняли и оценили важную и полезную роль случайности экономисты и военные... Случайность не пассивна, она активно вмешивается в жизнь, путая планы и создавая возможности. Трудно переоценить влияние случайности на природу, на нашу жизнь. Достаточно сказать, что происхождение жизни является случайным процессом. Случай в природе неизбежен и закономерен. Он бывает слепым, а бывает и удивительно «прозорливым»; рушит так же неизбежно, как и созидает; вызывает сожаление столь же часто, как и восторг; препятствует и одновременно помогает» [104, с. 6 – 7J Итак, согласно современной точке зрения, *случай не только мешает, путая и разрушая наши планы, но и помогает, создавая новые возможности.* Случай выступает в роли не только нашего *врага,* но и *союзника* и даже *помощника*.

Учитель. Честно говоря, такая точка зрения на случайность для нас непривычна. Неудивительно, что школа не пропагандирует её.

Автор. Она непривычна, как непривычна всякая новая более прогрессивная концепция. Ничего не поделаешь — надо перестраиваться. Давно назрела необходимость откровенного разговора с учащимися о роли случайного. Наверное, надо объяснить им, что такое *субъективная* и *объективная* случайности и, значит, в чём состоит различие между натурфилософиями Демокрита и Эпикура, настолько заинтересовавшее Карла Маркса, что он посвятил этому свою диссертацию (см. § 2). Очень важно объяснить учащимся, что объективная случайность связана вовсе не с нарушением принципа причинности, а с *отсутствием корреляции* между событиями, утратой предыстории (см. диалог «О привычке видеть за вероятностями однозначные закономерности»).

Учитель. Боюсь, в рамках существующих школьных программ, не предполагающих формирование вероятностного мышления, трудно будет уделить случайности достаточное внимание.

Автор. И всё же надо начинать. Следует раскрывать фундаментальную роль случая, изучая некоторые вопросы, затрагиваемые в *существующем* курсе физики. В качестве примера можно указать *лазер* и *атомный реактор*.

Учитель. Не понимаю, какое отношение имеет случайность к лазеру или атомному реактору.

Автор. Как бы Вы стали объяснять возникновение генерации излучения в лазере?

Учитель. Очень просто. Если возбудить каким-либо способом значительную часть атомов среды, то при пропускании через такую среду световой волны можно получить усиление этой волны за счёт индуцированного испускания света возбуждёнными атомами. Таков принцип действия лазера; он изложен на с. 232 и 233 учебника [83].

Автор. В действительности Вы говорили не о лазере, а о квантовом усилителе. В случае лазера следует говорить не о *пропускании* световой волны через соответствующую среду, а о *генерации световой волны*. Как зарождается эта волна?

Учитель. Насколько я понимаю, она зарождается от самопроизвольных переходов атомов из возбуждённого состояния в основное.

Автор. Вот именно. Лазерная генерация *берёт начало от случайных актов* — самопроизвольных (спонтанных) переходов. Рождающиеся при этих переходах фотоны инициируют индуцированные переходы в других возбуждённых атомах; в результате возникают целые лавины фотонов, образующие лазерный луч.

Учитель. Но в спонтанных переходах рождаются фотоны со случайными направлениями движения; значит, индуцированно испущенные фотоны тоже должны иметь разные направления движения. Один спонтанно родившийся фотон, пролетая вблизи возбуждённых атомов, вызовет появление лавины индуцированных фотонов в направлении своего движения. Второй спонтанно родившийся фотон поведёт лавину индуцированных фотонов в другом направлении. Третий — в третьем направлении и т. д. Как же образуется лазерный луч?

Автор. Здесь решающую роль играет *резонатор* лазера; он «позволяет» усиливаться одним фотонным лавинам и выводит из игры другие фотонные лавины. Тем самым осу-

ществляется *избирательность* усиления; усиливаются лишь те лавины, которые порождены фотонами, спонтанно родившимися в направлении оптической оси зеркал резонатора. Это и есть направление лазерного луча. Подробнее мы об этом рассказывали в § 9.

Учитель. Получается, что если бы не было спонтанных переходов в атомах активного элемента лазера, то и не возникла бы лазерная генерация.

Автор. Совершенно верно. Из хаоса случайных, не согласованных друг с другом переходов возникает, в конечном счёте, остро направленное излучение. Обратите внимание: *лазерная генерация демонстрирует рождение порядка из хаоса.* Специалисты употребляют выражение «генерация начинается от уровня шумов». Так происходит в любом генераторе излучения и, в частности, в обычном ламповом генераторе электромагнитных колебаний или генераторе на транзисторе — везде генерация начинается от уровня шумов.

Учитель. А какова роль случайного в атомном реакторе?

Автор. Попробуем проследить, как начинается цепная реакция деления ядер урана.

Учитель. Попадая в ядро урана, нейтрон вызывает его деление на два осколка. При этом высвобождается некоторая энергия, и появляются два или три свободных нейтрона. Новые нейтроны вызовут деление уже двух-трёх ядер урана, число свободных нейтронов будет теперь ещё больше, и, значит, на следующем этапе разделится ещё больше ядер урана. Процесс развивается подобно лавине.

Автор. Но откуда берётся *первый* нейтрон?

Учитель. Возможно, из космического излучения.

Автор. Предположим, что мы имеем дело с атомной подводной лодкой, а лодка находится на значительной глубине. Толстый слой воды хорошо защищает её от космического излучения.

Учитель. В таком случае не знаю...

Автор. Дело в том, что ядро урана может разделиться не только при попадании в него нейтрона, но и чисто *случайно*, иначе говоря, спонтанно, самопроизвольно. *Именно от спонтанного деления ядер и берёт начало цепная реакция.*

Учитель. Но в обоих приведённых примерах (в лазере и атомном реакторе) фундаментальность случайного проявляется *на уровне микроявлений*, на атомном уровне, а *на макроуровне* никакой случайности нет. Командир подлодки, подавая команду включить двигатель, не рассчитывает на случайность. Нажимается кнопка — и включаются двигатели. Нажимается кнопка — и начинается генерация лазера. Хорошо бы увидеть фундаментальность случайного в масштабе макромира.

Автор. Это можно увидеть в биологии; примером может служить эволюция в живой природе, в основе которой лежит *отбор случайных изменений генетических программ, вызванных мутациями*. Об этом мы говорили в § 12.

Учитель. Поясните на каком-нибудь примере, как всё это происходит. Как именно действует отбор?

Автор. У некоторых орхидей цветы напоминают по виду самок шмелей. Опыляются они самцами шмелей, которые принимают цветы за самок. Предположим, что возникла мутация, изменившая форму или окраску цветка. Такой цветок останется неопылённым. Можно сказать, что отбор забраковал мутацию, изменившую внешний вид цветка. Но когда один из видов орхидей стал самоопылителем, цветы этого вида приобрели за счёт мутаций разнообразную форму и окраску.

Учитель. По-видимому, проблему случайного надо обсуждать не только на уроках физики, но и на уроках по другим предметам.

Автор. Конечно. Здесь крайне важно преодолеть разобщённость школьных предметов. Было бы полезно, например, объединив усилия учителей, преподающих разные предметы, подготовить и провести с учащимися диспут или конференцию на тему «Случайность в природе и нашей жизни».

Учитель. Вы отмечали, что случай может выступать в роли нашего помощника. Следовательно, возможны ситуации, когда целесообразно не избавляться от случайного, а,

напротив, *позаботиться о том, чтобы случайного было побольше*?

Автор. Такие ситуации действительно встречаются. У американского писателя Р. Ф. Джоунса есть любопытная фантастическая повесть «Уровень шума» (в 10-м томе «Библиотеки современной фантастики»). Группе учёных, являющихся специалистами в самых различных областях, официально сообщают, что сделано сенсационное открытие, но, к несчастью, изобретатель погиб при взрыве во время показа своего изобретения и унёс его тайну с собой. В действительности не было ни изобретения, ни погибшего изобретателя. Учёным предъявляют всё, что якобы осталось после гибели изобретателя: неразборчивые обрывки записей, лабораторию с обилием всевозможных приборов, библиотеку с книгами и журналами по всевозможным вопросам. Одним словом, учёным предоставлена обширная несистематизированная информация, насыщенная случайными сведениями из различных областей науки, техники, культуры — её можно назвать *информационным шумом*. И вот, будучи уверены, что изобретение состоялось на самом деле и, значит, поставленная задача имеет решение, учёные успешно используют предоставленный в их распоряжение информационный шум и раскрывают тайну несуществовавшего изобретения. Можно сказать, что им удаётся произвести *отбор нужной информации из шума*.

Учитель. Но ведь это всего лишь фантастическая повесть.

Автор. В современной науке и практике применяются специальные расчётные методы, основанные на использовании фактора случайного. Созданы специальные теории: *теория случайного поиска, теория массового обслуживания, теория игр* и др. Это уже не фантастика, это реальность нашего времени.

Учитель. Хорошо бы познакомить учащихся с чем-то конкретным.

Автор. Можно познакомить их с *методом Монте-Карло (методом статистических испытаний)*. Этот метод использует случайность в качестве своеобразного «инструмента», позволяющего успешно исследовать любые случайные процессы, проверять степень точности тех или иных моделей.

Учитель. Насколько мне известно, метод Монте-Карло предполагает непременное наличие ЭВМ.

Автор. Вы правы. Впрочем, сейчас во многих школах есть кабинеты информатики. Но даже если такого кабинета нет, можно продемонстрировать идею метода Монте-Карло «вручную» — пользуясь *таблицей случайных чисел*. Можно, например, найти приближённое значение числа π, поработав с этой таблицей примерно полчаса. Об этом подробно рассказывается в книге автора «Мир, построенный на вероятности» [120]; там же можно прочитать не только о методе Монте-Карло, но и системах массового обслуживания, теории игр, кибернетике и о многом другом. В книге рассказано о простейшей модели *персептрона* — кибернетического устройства для распознавания образов (в параграфе «На пути к стохастической модели мозга»). В этом удивительном устройстве фактор случайного закладывается *в саму конструкцию*: при монтаже каждой конкретной схемы провода, соединяющие светочувствительные элементы воспринимающего экрана с электрической «начинкой» устройства, припаиваются *случайным образом*, например в соответствии с указаниями, поступающими от какого-нибудь генератора случайных чисел.

Учитель. Случайность, заложенная в конструкцию устройства, случайность как инструмент исследования — это, наверное, самое удивительное. Мы привыкли бороться со случайностями или, в крайнем случае, учитывать их в своей практике. Но *сознательно использовать случай* для достижения нужного результата — это выглядит как некое чудо.

Автор. А между тем во всём этом не больше чудесного, чем в таблице случайных чисел. Собственно говоря, удивляться надо тому, что любой достаточно большой набор из случайных чисел или случайных событий обнаруживает поразительную внутреннюю *устойчивость,* выражаемую *точно определяемой вероятностью*. Можно сказать, что в любом «хорошем» хаосе обнаруживается упорядоченность, описываемая на языке вероятностей.

Учитель. Как я заметил, хаос и порядок идут рука об руку.

Автор. В этом есть глубокий смысл. Подобно тому как не имеет смысла говорить о положительном, если нет отрицательного, или, скажем, о наследственности, если нет изменчивости, точно так же не имеет смысла говорить о *случайном*, не учитывая при этом другую составляющую диалектической пары — *необходимость*. В «чистом виде» нет ни случайного, ни необходимого. Одно проявляется через другое. Как писал Ф. Энгельс «в природе, где также как будто господствует случайность, мы давно уже установили в каждой отдельной области внутреннюю необходимость и закономерность, которые пробивают себе дорогу в рамках этой случайности» [3, с. 174]. Вопрос о *диалектике необходимого и случайного* принципиально важен — мы рассмотрим его в § 13.

Учитель. Необходимость пробивает себе дорогу через случайности. Мне кажется, что мы, преподаватели-естественники, явно недооцениваем эту мысль. А ведь она как раз и выражает современную концепцию случайного — из случайностей рождается необходимость, *из хаоса возникает порядок*.

§13. ПОРЯДОК ИЗ ХАОСА. ДИАЛЕКТИКА НЕОБХОДИМОГО И СЛУЧАЙНОГО

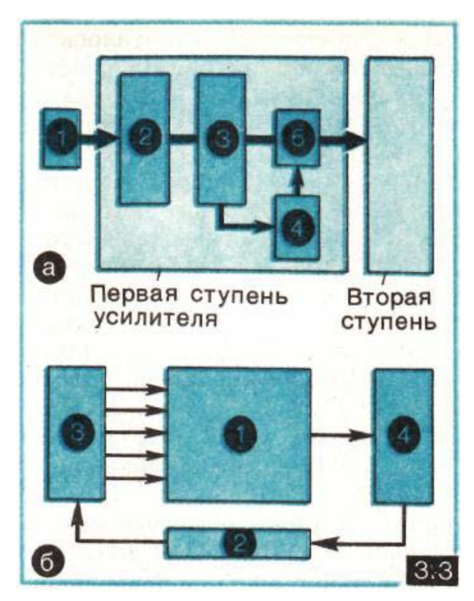
Отбор информации из шума. В предыдущем диалоге мы затронули вопрос об отборе информации из шума на примере фантастической повести Р. Ф. Джоунса «Уровень шума». Теперь поговорим об этой проблеме более подробно.

Хорошо известно, что всякая передача информации сопровождается потерями и искажениями, обусловленными действием случайных факторов. Можно сказать, что случайности крадут информацию. Однако далеко не всем известно, что *случайности не только крадут информацию, но и могут выступать в роли генератора информации*. На первый взгляд, это может показаться невероятным. Но задумайтесь, например, каким образом совершается процесс мышления, как рождается решение какой-либо задачи, как появляется новая идея, как возникает мелодия или художественный образ. Попробуйте — и вы вступите в область сложнейших связей, ассоциаций, вероятностных отношений, случайных догадок, внезапных «озарений». Не существует детерминированных алгоритмов для того, чтобы делать открытия и решать проблемы. Всё, что мы знаем сегодня о процессах, происходящих в нашем мозгу, указывает на принципиальную роль случайных факторов в этих процессах.

Шум может стать источником информации. Впервые эту «безумную» идею высказал Джонатан Свифт в своей книге о путешествиях Гулливера. Посетив Академию в Лагадо (название столицы фантастического королевства), Гулливер увидел там устройство из множества нанизанных на спицы кубиков, на сторонах которых были написаны «все слова их языка в различных наклонениях, временах и падежах, но без всякого порядка». По команде местного профессора ученики несколько раз повёртывали спицы с кубиками, что приводило к изменениям сочетаний слов. «Тогда профессор,— пишет Свифт, — приказал тридцати шести ученикам медленно читать образовавшиеся строки в том порядке, в каком они разместились в раме. Если случалось, что три или четыре слова составляли часть фразы, то её диктовали остальным четырём ученикам, исполнявшим роль писцов. Это упражнение было повторено три или четыре раза, и машина была так устроена, что после каждого оборота спиц слова принимали новое расположение по мере того, как кубики переворачивались с одной стороны на другую». Правда, Свифт пишет об этом в сатирическом духе, он как бы высмеивает подобные изобретения. Однако почему бы нам не считать, что тут под маской сатирика скрывался талантливый фантаст, который прибег к сатире из опасения быть непонятым современниками?

И вот то, что казалось смешным в XVIII в., превратилось в объект научного исследования в середине XX в. В начале 50-х годов У. Эшби предложил кибернетическое устройство, представляющее собой *усилитель отбора* (он назвал его усилителем мыслительных

способностей). Его схема дана на рисунке 3.3, *а.* Генератор шума *1* поставляет «сырьё» в первую ступень усилителя. Преобразователь шума *2* создаёт разные случайные варианты объектов отбора. В блоке *3* происходит отбор в соответствии с заложенными в устройство критериями отбора. Если результат отбора удовлетворяет критерию, срабатывает блок управления *4*, открывая клапан *5* и пропуская отобранную информацию в преобразователь следующей ступени усилителя. Можно представить себе, что в первой ступени усилителя, куда поступают случайные буквы, происходит отбор отдельных случайно возникших слов или характерных слогов; во второй ступени происходит отбор сочетаний слов; в третьей — отбор фраз и т. д.



Пусть некая система находится в состоянии, позволяющем ей выполнять определённые функции; назовём его нормальным состоянием. Допустим, что внешние условия вдруг изменились, в результат чего система вышла из нормального состояния. Новым условиям отвечает и новое нормальное состояние. Желательно перевести систему в это новое состояние. Как это сделать? Поскольку изменение условий имеет, как правило, случайный характер, мы не знаем, ни каким будет новое нормальное состояние, ни как организовать переход в него. Здесь на помощь приходит *случайный поиск*: надо случайным образом изменять параметры системы до тех пор, пока она случайно не окажется в новом нормальном состоянии. В процессе случайного поиска возникает как раз та информация, которая нужна для перевода системы в новое состояние. Это есть не что иное, как *отбор информации из шума*. Критерием отбора является изменение поведения системы: попав в новое нормальное состояние, она «успокаивается», начинает нормально функционировать. В 1948 г. Эшби сконструировал устройство, обладающее свойством *самоорганизации на основе случайного поиска*; он назвал его *гомеостатом*. Схема устройства дана на рисунке 3.3, *б.* Основой служит система *1*, которая может находиться либо в устойчивом, либо в неустойчивом состоянии. Не входя в технические детали, заметим лишь, что система *1* состоит из четырёх электромагнитов, сердечники которых могут поворачиваться и передвигать ползунки реостатов, управляющих электропитанием. Углы поворота магнитов оказываются взаимосвязанными; они и представляют собой параметры данной системы. В устойчивом состоянии все электромагниты неподвижны. Пусть внешнее возмущение выводит гомеостат из устойчивого состояния. Немедленно блок управления *2* включает генератор случайных изменений параметров *3*. Начинается случайный поиск. Как только система случайно попадает в устойчивое состояние, блок проверки устойчивости *4* подаёт сигнал отбоя. Гомеостат сравнивают со спящей кошкой. Если кошку потревожить, она проснётся, поворочается, выберет новое удобное положение и снова заснёт. Точно так же гомеостат: «проснувшись», он осуществляет активный случайный поиск новых значений своих параметров и, найдя их, как бы снова «засыпает».

Порядок из хаоса; самоорганизация в сложных открытых неравновесных системах. Отбор информации из шума — это, в сущности, процесс рождения порядка из хаоса. Мы уже отмечали, что в любом генераторе излучения — от лампового генератора до лазера — также совершается рождение порядка из хаоса. Этот удивительный процесс составляет сущность эволюции Вселенной — от Большого взрыва до появления человека, способного осознать эту эволюцию.

Человек давно понял: первоначально был хаос, из него с течением времени образовались всевозможные упорядоченные структуры, живые существа и, наконец, он сам. Как всё это могло совершиться? Именно в этом вопросе основной водораздел между *религией* и *наукой*. Религия утверждает, что решающую роль в возникновении порядка из хаоса играл творец, бог. Современная наука отводит эту роль случайным процессам; роль бога играет в действительности Его Величество Случай. *Процесс возникновения порядка из хаоса — не результат вмешательства свыше, а результат самоорганизации материи на основе случайного поиска*. Нам остаётся в очередной раз подивиться глубине видения мира А. С. Пушкиным, предсказавшим появление «открытий чудных», к которым причастен «случай, бог-изобретатель».

В процессе самоорганизации материи первоначальный хаос элементарных частиц, образовавшийся после Большого взрыва, постепенно организовался сначала в атомные ядра и атомы, затем в вещество звёзд и планет. Этот процесс привёл к возникновению жизни на Земле, появлению всё более сложных видов. На первый взгляд, эволюция в живой природе, сопровождающаяся, по Дарвину усложнением видов, *находится в противоречии* со вторым началом термодинамики, согласно которому материя должна со временем деградировать (должна возрастать энтропия). «По теории Дарвина сначала происходят спонтанные флуктуации видов, после чего вступает в силу отбор и начинается необратимая биологическая эволюция. Как и у Больцмана, случайность приводит к необратимости. Однако результат эволюции у Дарвина оказывается иным, чем у Больцмана. Интерпретация Больцмана влечёт за собой забывание начальных условий, “разрушение” начальных структур, тогда как дарвиновская эволюция ассоциируется с самоорганизацией, с неуклонно возрастающей сложностью» [96, с. 182].

Можно попытаться обойти данное противоречие, указав, что дарвиновская эволюция связана с пространственно-локальным уменьшением энтропии за счёт ещё более значительного возрастания энтропии в остальном пространстве. В таком объяснении есть определённый резон, поскольку уменьшение энтропии в процессе творческой, созидательной деятельности человека сопровождается, как известно, возрастанием энтропии в результате роста отходов производства, образования продуктов сгорания и т. д. И всё же приведённое объяснение не может удовлетворить — нельзя связать с *локальным* уменьшением энтропии *глобальный* процесс самоорганизации материи от Большого взрыва до человека.

Здесь необходимо принять во внимание принципиальное различие между системами *замкнутыми* и *открытыми*. Возрастание энтропии происходит в замкнутой системе; только изолированная от окружающего мира система может прийти в равновесное состояние, отвечающее «тепловой смерти». Но в природе, строго говоря, нет замкнутых систем; такие системы — это всегда некоторая идеализация, *искусственность*. Напомним слова, с какими в гётевском «Фаусте» обращается гомункулус к создавшему его алхимику:

Прижми к груди свое дитя!
Но бережно, чтоб не разбилась склянка.
Вот неизбежная вещей изнанка:
Природному Вселенная тесна,
Искусственному ж замкнутость нужна!

Следует различать два вида процессов. Процессы *в замкнутых системах,* ведущие к установлению теплового равновесия, сопровождаются возрастанием неупорядоченности;

они идут в направлении *от порядка к хаосу*. Процессы же *в сугубо неравновесных открытых системах* могут идти в обратном направлении — *от хаоса к порядку*. Это и есть процесс *самоорганизации*.

Самоорганизация обстоятельно рассматривается в цитированной выше книге И. Пригожина и И. Стенгерс. Авторы подчёркивают: «Ныне мы знаем, что вдали от равновесия могут спонтанно возникать новые типы структур. В сильно неравновесных условиях может совершаться переход от беспорядка, теплового хаоса к порядку» [96, с. 54]. Они назвали новые типы структур, возникающие в процессе самоорганизации, *диссипативными структурами*, поскольку для их поддержания требуется больше энергии, чем для поддержания предшествующих более простых структур.

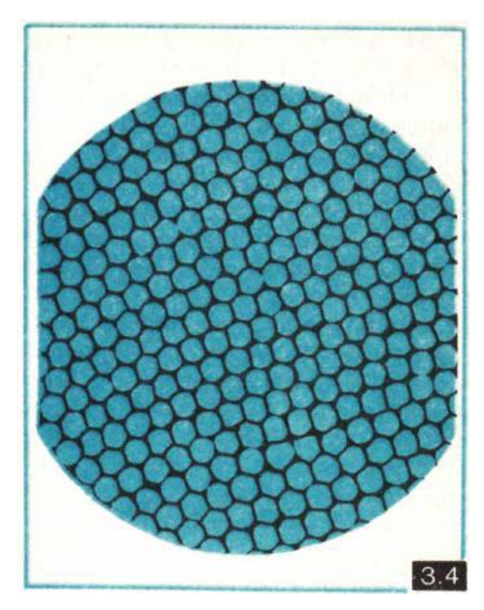
В предисловии к упомянутой книге изложены кратко некоторые результаты, полученные авторами. Там, в частности, говорится: «Если воспользоваться терминологией Пригожина, то можно сказать, что все системы содержат подсистемы, которые непрестанно *флуктуируют*. Иногда отдельная флуктуация может стать (в результате положительной обратной связи) настолько сильной, что существовавшая прежде организация не выдерживает и разрушается. В этот переломный момент (который авторы книги называют *особой точкой* или *точкой бифуркации*) принципиально невозможно предсказать, в каком направлении будет происходить дальнейшее развитие: станет ли состояние системы хаотическим или она перейдёт на новый, более дифференцированный и более высокий уровень упорядоченности или организации, который авторы называют *диссипативной структурой*... Пригожин подчёркивает возможность *спонтанного* возникновения порядка и организации из беспорядка и хаоса в результате процесса *самоорганизации*» [96, с. 17 – 18]. И дальше: «...Необратимые процессы являются источником порядка. Тесно связанные с открытостью системы и случайностью, необратимые процессы порождают высокие уровни организации... Именно поэтому одним из лейтмотивов предлагаемой вниманию читателя книги служит новая, весьма необычная интерпретация второго начала термодинамики, предложенная авторами. По мнению Пригожина и Стенгерс, энтропия — не просто безостановочное соскальзывание системы к состоянию, лишённому какой бы то ни было организации. При определённых условиях энтропия становится прародительницей порядка» [96, с. 25].

Что такое синергетика? Слово «синергетика» происходит от греческих «вместе» и «действую». Этот термин сравнительно давно применяется в физиологии: группы мышц, действующих совместно для осуществления одного движения, называют *синергистами*. Использование же данного термина в качестве названия нового научного направления было предложено совсем недавно немецким учёным Г. Хакеном. Он предложил назвать *синергетикой* область науки, которая занимается изучением эффектов самоорганизации в физических, химических, биологических и других системах. Иными словами, синергетика — это наука о самоорганизации в неравновесных открытых системах различной природы, *наука о законах рождения порядка из хаоса*. Такая наука пока ещё не существует, она только ещё начинает развиваться. «Тем не менее, это слово, как некий лозунг, оказалось привлекательным для многих учёных, занимающихся вопросами появления и развития порядка в сложных системах. Они увидели родственные черты во многих явлениях, и в процессе обсуждения этих явлений образовался неформальный коллектив учёных, которые активно исследуют упорядоченные структуры» [50, с. 3].

Более подробно с идеями синергетики можно познакомиться по книгам [60, 86, 140]. Здесь же мы ограничимся несколькими примерами.

Первый пример — *облачность*. Всякий, кто летал на самолёте над облаками, мог не раз наблюдать их регулярную, весьма упорядоченную структуру. Можно наблюдать почти правильные прямоугольные и шестиугольные ячейки облаков, регулярные валы, прямолинейные «улицы». Весь этот геометрический порядок образовался из хаоса молекулярных движений, разнообразных возмущений в воздушной атмосфере и слое водяных паров, вызываемых неравномерностью их прогревания, приводящей к интенсивной конвекции.

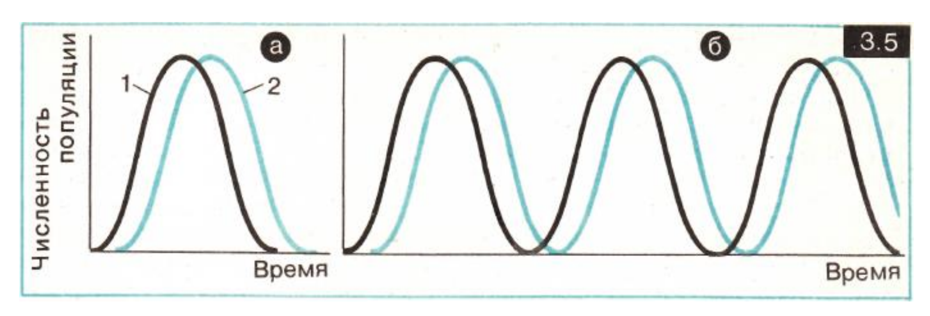
Второй пример — *неустойчивость Бенара* (это явление было обнаружено Г. Бенаром ещё в 1900 г.). Явление совсем нетрудно воспроизвести. Надо налить в обычную сковороду слой минерального масла толщиной примерно 5 мм, добавив в масло (чтобы эффект был виден отчётливее) мелкие алюминиевые опилки. Затем надо поставить сковороду на огонь. Вначале, пока перепад температуры между дном сковороды и поверхностью масла ещё невелик, подводимая снизу теплота будет распространяться вверх за счёт теплопроводности. При дальнейшем нагревании начнётся конвекция: нагретое масло будет подниматься, а холодное опускаться. Пространственное распределение этих двух встречных потоков через некоторое время *самоорганизуется* — возникает *упорядоченная структура из шестиугольных конвекционных ячеек* — ячеек Бенара (рис. 3.4). В центре каждой ячейки масло поднимается вверх, а по краям опускается. «Неустойчивость Бенара — явление весьма впечатляющее. Конвективное движение жидкости порождает сложную пространственную организацию системы. Миллионы молекул движутся согласованно, образуя конвективные ячейки в форме правильных шестиугольников некоторого характерного размера» [96, с. 196].



Третий пример — *химические часы*. Мы представляем себе химическую реакцию так: в разных направлениях в пространстве движутся молекулы реагентов и случайным образом сталкиваются друг с другом. Казалось бы, в такой картине самоорганизация невозможна. Но это не так. При определённых условиях некоторые химические реакции сопровождаются *периодическими* изменениями (во времени и в пространстве) концентраций реагентов. С течением времени один реагент сменяется другим, затем вновь восстанавливается и снова исчезает. Всё это происходит через определённые промежутки времени. Получается *периодический* химический процесс — химически часы. «Предположим, — пишут И. Пригожин и И. Стенгерс, — что у нас имеются молекулы двух сортов: “красные” и “синие”. Из-за хаотического движения молекул можно было бы ожидать, что в какой-то момент в данной части сосуда окажется больше красных молекул, в другой момент больше станет синих и т. д. Реакционная смесь должна была бы иметь трудно поддающийся описанию цвет: фиолетовый с беспорядочными переходами в синий и красный. В случае химических часов наблюдается иная картина: *вся* реакционная смесь имеет синий цвет, затем её цвет резко изменяется на красный, потом снова на синий и т. д. Поскольку смена окраски происходит через *правильные* интервалы времени, мы имеем дело с когерентным процессом. Столь высокая упорядоченность, основанная на согласованном поведении миллиардов молекул, кажется неправдоподобной, и, если бы химические часы нельзя было наблюдать “во плоти”, вряд ли кто-нибудь поверил, что такой процесс возможен. Для того чтобы одновременно сменить цвет, молекулы должны “каким-то образом” поддерживать связь между собой. Система должна вести себя как единое целое» [96,

с. 202 – 203]. Заметим, что в последнее время обнаруживается всё больше таких процессов; их называют *автоволновыми*. Любопытно, что биение сердца, как оказалось, поддерживается целым комплексом осциллирующих химических реакций. Часто используемое вольное сравнение здорового сердца с часами приобретает сегодня конкретный смысл — это химические часы.

Четвёртый пример — *периодичность изменения численности популяций кроликов и лисиц*. Предположим, что в некоторой местности, где в изобилии растёт трава, живут кролики. Там же живут лисицы, поедающие кроликов. За лисицами охотятся люди; они истребляют их ради меха. Итак, кролики пасутся, размножаются, лисицы их поедают и тоже размножаются, человек отлавливает лисиц. Травы сколько угодно, поэтому численность кроликов быстро растёт. Соответственно начинает расти и численность лисиц, что неизбежно приводит к прекращению роста, а затем и снижению численности кроликов. Это, в свою очередь, снижает рождаемость лисиц, а поскольку человек всё время отлавливает их, то вслед за снижением численности кроликов происходит и снижение численности лисиц. Рассматриваемая ситуация показана на рисунке 3.5, *а,* где *1* — численность кроликов, *2* — численность лисиц. Однако этим картина изменения численности популяций не исчерпывается. В отсутствие лисиц кролики снова начинают бурно размножаться — и всё повторяется снова. В результате возникает *периодичность* в изменении численности популяций со временем (рис. 3.5, *б*). Эта периодичность оказывается *строгой* и в известном смысле аналогична химическим часам.



Диалектика необходимого и случайного. Мы приложили немало усилий, чтобы убедить читателя в том, что фундаментальны не динамические, а статистические (вероятностные) закономерности. Этим усилиям противостояло присущее нам всем стремление объяснить окружающий мир на основе однозначных связей, разложить всё «по полочкам», достичь во всём предельной ясности, исключающей неопределённость или недоговорённость. Иными словами, необходимо было преодолеть внутреннюю симпатию к чётким метафизическим моделям, не содержащим каких-либо полутонов, противоречий. Указанное преодоление как раз и связано с переходом от менее глубокого к более глубокому рассмотрению законов природы.

В динамических закономерностях принципиально отсутствуем диалектика необходимого и случайного. *Случайное здесь попросту исключается, а необходимое абсолютизируется*. Диалектику необходимого и случайного выражают именно статистические закономерности. Собственно говоря, уже *отсюда* можно было бы сделать вывод в пользу концепции примата статистических закономерностей. Однако такой вывод явился бы достаточно убедительным лишь для тех, кто хорошо владеет диалектикой. К сожалению, этого нельзя сказать о многих учителях (а тем более учащихся), поэтому потребовалась развёрнутая аргументация упомянутой концепции, с тем чтобы лучше продемонстрировать диалектику необходимого и случайного. «Исследование соотношения динамических и статистических законов неразрывно связано с пониманием категорий необходимого и случайного. На основе этого исследования *с наибольшей полнотой может быть раскрыта диалектика необходимого и случайного, пронизывающая процессы окружающей нас природы* (курсив наш. — *Авт.*). Единство противоположных категорий необходимого и случайного, утверждаемое в философии диалектического материализма, в статистических закономерностях физики выступает непосредственно. В них мы можем проследить, так сказать,

“механизм” связи необходимого и случайного, причём сама она представляется в строго количественной форме» [81, с. 8].

Итак, переход от динамического описания природы к статистическому (вероятностному), от динамических закономерностей к вероятностным — это, по сути дела, переход от *метафизического* рассмотрения исследуемого мира к *диалектическому*. Приводившаяся ранее мысль, что динамические закономерности соответствуют *начальному* этапу в процессе познания человеком мира, а статистические — *следующем*у, более глубокому этапу, приобретает теперь весьма глубокий смысл: на первом этапе человек познавал мир метафизически, а на следующем этапе — диалектически. Переход от первого этапа к следующему (переход от физики XIX столетия к современной физике) — это есть фактически переход от метафизическом исследования мира к диалектическому.

Диалектика необходимого и случайного лежит в основе методологии современной физики. Она не признаёт ни «чистой» случайности, ни «чистой» необходимости.

В самом деле, попробуем представить себе *абсолютно случайный* мир, т. е. мир, где есть «чистая» случайность и вообще нет необходимости. В таком, мире отсутствуют какие бы то ни было причинно-следственные связи. В диалоге «О привычке видеть за вероятностями однозначные закономерности» мы отмечали, что за всяким объективно случайным событием стоят какие-то причины, вызвавшие данное событие, что случайность связана с некоррелированностью событий, что событие, оказывающееся случайным в «одной плоскости», является в то же время необходимым в какой-то «другой плоскости». Но в абсолютно случайном мире необходимости нет вообще, значит, здесь случайное событие становится попросту *беспричинным*. Такой мир можно было бы назвать абсолютным хаосом, в нём *ничто ни из чего не следует и ничто ни на что не влияет.* Какое-либо развитие в этом мире исключено. Подобный мир абсурден, нереален.

Попробуем теперь вообразить другую метафизическую крайность — *абсолютно необходимый* мир, т. е. мир, где есть «чистая» необходимость и вообще нет случайностей. В таком мире *всё жестко и раз навсегда предопределено,* всё намертво опутано цепями чётких предписаний. Как и в абсолютно случайном мире, в таком мире исключено какое-либо развитие. Он столь же нежизнен и нереален.

Ясно, что реальный мир должен включать в себя *и случайность, и необходимость*. Случайность без необходимости, как и необходимость без случайности приводят к абсурду, к заведомо нереальной картине мира.

Можно поставить и такой вопрос: имеет ли смысл говорить о необходимости, если не рассматривается понятие случайного? Или: имеет ли смысл говорить о случайности, если не принимается во внимание понятие необходимого? Мы понимаем, что нельзя говорить о положительном, если нет понятия отрицательного. Биологи исследуют наследственность именно потому, что существует изменчивость. Мы выделяем симметричные формы, потому что можем различить симметричное и асимметричное. Мы говорим об общем, потому что существует частное, единичное. Точно так же следует воспринимать необходимое и случайное: необходимость как противоположность, отрицание случайности; случайность как противоположность, отрицание необходимости. И притом не просто противоположность. *Необходимое и случайное едины в своей противоположности*. В случайностях проявляется необходимость, в хаосе есть упорядоченность. В любом порядке присутствуют проявления беспорядка, и напротив, в любом беспорядке проявляется некий порядок. Поэтому наряду с переходами *от порядка к хаосу* (переходами, привычными для нас) надо рассматривать переходы *от хаоса к порядку* (переходы, к которым мы ещё только начинаем привыкать). Исследуя процессы самоорганизации, отбора информации из шума, современная наука наиболее убедительно утверждает диалектику необходимого и случайного.

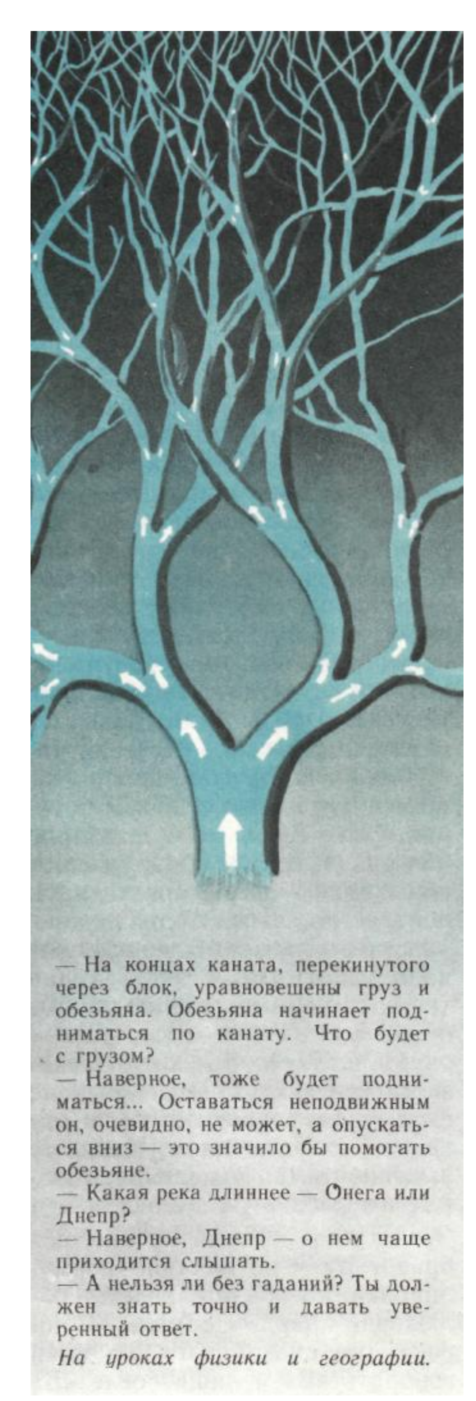
В процессе преподавания физики, химии, биологии (и других предметов) принципиально важно на конкретных примерах демонстрировать известные слова Ф. Энгельса о том, что необходимость пробивает себе дорогу в рамках случайности. Удары молекул о

стенки сосуда случайны, но необходима зависимость давления газа от его температуры (при заданном объёме). Акты деления ядер урана случайны, но развитие цепной реакции необходимо. Спонтанные переходы атомов с возбуждённого уровня на основной случайны, но возникновение лазерной генерации необходимо. Флуктуации плотности воздуха в атмосфере случайны, но голубой цвет неба необходим. Столкновения молекул реагентов случайны, но ход химической реакции необходим. Местонахождение электронов двух атомов, вступающих во взаимодействие, случайно, но возникновение химической связи необходимо. Мутации случайны, но процесс отбора необходим. Само по себе то или иное открытие случайно, но необходима (закономерна) логика развития науки, приводящая, в конечное счёте, к открытию. В рамках общества отдельные рождения людей случайны, но закономерен рост численности населения. Подобных примеров можно найти очень много в рамках любого школьного предмета. Ими изобилует и окружающая нас действительность.

Хотелось бы подчеркнуть: необходимость, выявленная из массы случайностей, выражается математически через *вероятность*. Теория вероятностей есть аппарат, позволяющий рассмотреть диалектику необходимого и случайного *количественно*. Важно понимать: *отдельные элементы* меняются от случая к случаю, а *картина в целом* обнаруживает устойчивость, закономерность, которая и выражается через вероятность. Именно поэтому наш мир оказывается достаточно гибким, динамичным, способным к развитию. Это есть мир, *построенный на вероятности*.

Большой энтузиаст вероятностных методов венгерский математик А. Реньи (1921 – 1970) написал великолепное эссе «Письма о вероятности». Строками из этих «Писем» мы и закончим обсуждение диалектики необходимого и случайного: «На днях, приводя в порядок книги, я наткнулся на «Размышления» Марка Аврелия и случайно открыл ту страницу, где он пишет о двух возможностях: либо мир является огромным хаосом, либо в нём царствуют порядок и закономерность... И хотя я уже много раз читал эти строки, но теперь впервые задумался над тем, а почему, собственно, Марк Аврелий считал, что в мире господствует либо случайность, либо порядок и закономерность? Почему он думал, что эти две возможности исключают друг друга? Мне кажется, в действительности оба утверждения не противоречат друг другу, более того, они действуют одновременно: в мире господствует случай и одновременно действуют порядок и закономерность, которые формируются из массы случайностей согласно законам случайного» [105, с. 175].

Диалог. О формировании у школьников вероятностного мышления



— На концах каната, перекинутого через блок, уравновешены груз и обезьяна. Обезьяна начинает подниматься по канату. Что будет с грузом?
— Наверное, тоже будет подниматься... Оставаться неподвижным он, очевидно, не может, а опускаться вниз — это значило бы помогать обезьяне.
— Какая река длиннее — Онега или Днепр?
— Наверное, Днепр — о нем чаще приходится слышать.
— А нельзя ли без гаданий? Ты должен знать точно и давать уверенный ответ.
На уроках физики и географии.

Учитель. Мне пришла в голову довольно грустная мысль. Во все времена человеку приходилось сталкиваться со случайностями. И во все времена школа не готовила его к этим встречам. Она всегда выдвигала на передний план всевозможные догматы, знакомила только с однозначными закономерностями, требовала от учеников строго детерминированного поведения, определяемого жёсткими правилами. Она не хотела замечать вероятность, она связывала её с азартными играми и не желала иметь с ней дело. Она всегда требовала: так и никак иначе. Получается, что школа всегда была оторвана от жизни.

Автор. Это и в самом деле грустная мысль. Тем более что она в равной мере относится и к сегодняшней школе. Причем для сегодняшней школы упомянутый Вами отрыв от жизни оказывается ещё более глубоким и драматичным — ведь современная жизнь гораздо сильнее (по сравнению с прошлым веком) опирается на вероятностные закономерности.

Учитель. Конечно, жизнь заставляет нашу школу как-то учитывать вероятностные подходы. Школьников знакомят с элементами квантовой физики, генетики, информатики, начинают приобщать к деловым играм.

Автор. К сожалению, всё это попадает на неподготовленную почву догматического мышления. Что толку в случайных обращениях к слову «вероятность»? Наши школьники не знают, что такое вероятность, зачем она, как с ней обращаться. Точно так же нет никакого толка в призывах развивать на уроках физики диалектическое мышление, воспитывать диалектико-материалистическое мировоззрение. Призывы, как известно, ничего не дают — надо систематически знакомить учащихся с диалектикой необходимого и случайного, вводить их в вероятностный мир, учить ориентироваться и работать в этом мире. А для этого требуется *формировать вероятностное мышление*. Без него диалектическое мышление, а значит, и диалектико-материалистическое мировоззрение состояться не могут.

Учитель. А что, собственно говоря, входит в понятие «вероятностное мышление»?

Автор. Многое. Понимание условности догматов, ориентация на многовариантность, готовность к перестройке, к поиску оптимальных путей. Необходимо правильное отношение к случайному, понимание не только его отрицательной, но и положительной роли в нашей жизни (см. предыдущий диалог). Нужно владеть диалектикой необходимого и случайного. Наконец, надо знать и уметь применять вероятностные методы, вероятностные подходы — не только в научной деятельности, но и во всей практической работе, в повсе-

дневной жизни.

Учитель. Может быть, такая задача не под силу школе? Значительно проще учить догматически, ориентировать на определённые решения, на чётко и однозначно поставленные задачи.

Автор. Конечно, мы тяготеем к однозначности, определённости, чёткости. Но нельзя забывать, что в то же время человеку присущи зачатки вероятностного мышления. Недаром маленькие дети так хорошо воспринимают сказки. Помните у Пушкина: «Сказка ложь, да в ней намёк...» Здесь присутствует самая настоящая диалектика (так, да не так; в какой-то мере действительность, а в какой-то мере выдумка, игра), и ребёнок прекрасно впитывает эту диалектику, он чувствует себя в мире сказки как рыба в воде. И вот представьте: приходит такой ребёнок в школу, и его окунают в скуку формулировок, требуют от него чётких ответов и понемногу гасят зачатки вероятностного (диалектического) мышления. Возьмите приведённый в качестве эпиграфа диалог между учителем и учащимся. Он и характерен, и нехарактерен. Вряд ли характерно для нашей школы обнаруженное школьником умение мыслить вероятностно, зато, к сожалению, характерна позиция учителя: не надо гадать, надо знать точно (не надо размышлять, надо помнить).

Учитель. Вы хотите сказать, что школа не только на формирует вероятностное мышление, но уничтожает даже те зачатки такого мышления, которые имелись у учащегося?

Автор. Когда учащегося ориентируют на жёсткие формулировки, на обязательность соблюдения правил формальной логики (не сказав «А», не смей говорить «Б» и лишь после «Б» переходи к «В»), когда от него ждут не размышлений, а заучивания материала, когда его приучают только слушать и не дают возможности поспорить, тогда поневоле исчезнут всякие зачатки вероятностного мышления. И будет происходить приобщение не к диалектике, а к метафизике.

Учитель. Я с Вами согласен.

Автор. О необходимости формирования у наших школьников вероятностного мышления в последнее время говорится всё чаще. Об этом пишет и журнал «Советская педагогика»: «Особого внимания заслуживает вопрос о том, как рассматриваются в сегодняшней школе причинно-следственные связи. Непропорционально большой объём механики в общей структуре учебного предмета «Физика», рассмотрение на уроках математики и физики упражнений и задач, как правило, только с точными расчётами «под ответ» — всё это способствует стихийному формированию у школьников представления о причинности как о жёстком механическом детерминизме. Получается, что мы готовим молодёжь для некоего несуществующего мира, где всё однозначно определено, где точно выполняются жёсткие прогнозы, где всё катится по заранее уложенным рельсам. Поэтому не удивительно, что недавние выпускники школы часто чувствуют себя довольно неуютно, столкнувшись с противоречиями и трудностями реального мира, характеризующегося не однозначными механическими зависимостями, а более сложными связями — вероятностными, многовариантными» [103, с. 6].

Учитель. А как *практически* начать формирование вероятностного мышления у учащихся? Ведь, наверное, для этого потребуется изменить программы?

Автор. Думаю, что начинать надо не с изменения программ. Начинать надо с *преодоления сковывающей развитие нашей школы разобщённости учебных предметов*. Необходим союз учителей — математиков, физиков, химиков, биологов и др. Не борьба за дополнительные, часы и приоритет своего предмета, а совместные усилия, направленные на общую цель: формирование вероятностного мышления, раскрытие диалектики необходимого и случайного. Конечно, необходим своеобразный дирижёр. Его роль может играть, например, учитель физики.

Учитель. В чём именно заключается эта роль?

Автор. Во-первых, на собственных уроках он должен акцентировать внимание на вопросах, имеющих вероятностную природу, объяснить, что такое вероятность, поговорить о специфике вероятностных законов, о принципиальной роли случайности, о связи слу-

чайного и необходимого. На соответствующем уровне это можно (и должно) делать уже в VII классе — при рассмотрении строения вещества, давления в жидкости и газах, броуновского движения, а в VIII классе при изучении тепловых явлений и, в частности, фазовых переходов. Более глубоко и обстоятельно вероятностные закономерности могут быть рассмотрены на материале X и XI классов, здесь следует обосновать фундаментальность этих закономерностей. Надеюсь, что информация, содержащаяся в данной книге, поможет учителю физики полнее раскрыть эти вопросы.

Во-вторых, выступая в качестве дирижёра, учитель физики должен позаботиться о том, чтобы на уроках химии обращалось внимание на вероятностный характер химических реакций, вероятностную природу электронных облаков в атомах, чтобы на уроках биологии обсуждалась вероятностная сущность естественного отбора, законов Менделя, мутаций. На уроках физики, химии, биологии учащиеся должны встречаться с демонстрацией общего принципа — *вероятностные закономерности фундаментальны, так как выражают диалектику необходимого и случайного*. На уроках по разным предметам учащиеся должны встречаться с ситуациями, когда в хаосе обнаруживается порядок, когда из хаоса рождается порядок. Всё это должно иметь выход на предмет «Обществоведение», на вопросы материалистической диалектики. Заметим, что с вероятностным подходом тесно связан многовариантный подход; он должен находить отражение при преподавании истории и литературы.

Учитель. Хорошо, что всё это не требует изменения учебного плана. Фактически это можно сделать в любой школе.

Автор. Думаю, что не следует особенно бояться и изменений учебного плана. Такая сложная и важная задача, как формирование вероятностного мышления, *требует* и *заслуживает* проведения смелых педагогических экспериментов, связанных с изменением учебного плана. Мне кажется, что во многих школах можно было бы ввести в VII, а ещё лучше в VI классе предмет (возможно, факультативный) «Вероятность в играх и развлечениях». Есть, кстати, очень хорошая книга с таким названием, написанная как пособие для учителя известными педагогами Морисом Глеманом (Франция) и Тамашем Варгой (Венгрия). По их мнению, эти игры и развлечения можно начинать ещё раньше, уже в начальной школе. Приведём довольно глубокое замечание, сделанное авторами книги: «Сталкиваясь со случайной ситуацией, маленькие дети думают, что можно *предсказать* её исход; становясь немногой постарше, они отвечают, что *ничего нельзя утверждать*; но мало-помалу они открывают, что за кажущимся хаосом мира случайности можно обнаружить законы, которые позволяют неплохо ориентироваться в реальности. До 14 – 15-летнего возраста представляется очень трудным ввести теорию вероятностей как *дедуктивную науку*; но тем не менее, как мы пытались показать в этой книжке, можно подвести детей к тому, чтобы они смогли угадать и почувствовать законы случая, а затем и использовать их. Теорию вероятностей следует рассматривать не только как раздел математики, но также как один из подходов к реальному миру» [36, с. 175].

Учитель. Наверное, школьников надо знакомить с идеями массового обслуживания, управления, кибернетики. Ведь в современной жизни без всего этого трудно ориентироваться.

Автор. В наше время разрабатываются и апробируются экспериментальные учебные планы, в которых появляются, наряду с обычными, учебные предметы качественно нового типа — их можно назвать *интегративными*. Они синтезируют сведения из разных предметов, из разных областей научной и практической деятельности человека. В одном из экспериментальных планов предусматривается, например, интегративный предмет «Закономерности окружающего мира». В цитированной ранее статье из «Советской педагогики» об этом предмете написано следующее: «Его задача: заложить основы вероятностного мышления учащихся, показать, что вероятностные закономерности наблюдаются везде в человеческой практике и являются фундаментальными закономерностями в природе. Изучая данный предмет, учащиеся пройдут через три этапа. Первый этап — вероятность в иг-

рах и развлечениях (случайные числа, генераторы случайных чисел; случайные события; дискретные случайные величины, распределения; случайные процессы). Второй этап — вероятность в человеческой практике (системы массового обслуживания, очереди; статистические испытания; игры и принятие решения в условиях неопределённости; управление, информация, вероятность; кибернетические системы, отбор информации из шума). Третий этап — вероятностные закономерности в естествознании: физике, биологии, химии» [103, с. 9].

Учитель. Каким классам отвечают указанные три этапа?

Автор. Первый этап — это VI класс, второй этап — VII класс, третий этап — VIII класс.

Учитель. Начато ли где-нибудь преподавание этого предмета?

Автор. Да, он начал преподаваться с 1 сентября 1988 г. в нескольких московских школах, добровольно решивших перейти на экспериментальный учебный план «Экология и диалектика», разработанный Московским городским институтом усовершенствования учителей. Об этом экспериментальном плане, его специфике и задачах писала газета «Московский комсомолец» от 26 апреля 1988 г.

Учитель. Всё это очень интересно.

Автор. Надо как можно скорее сдвинуть дело с мёртвой точки. Поэтому очень важно, чтобы педагоги и работники народного образования понимали острую необходимость введения вероятности в школьные программы и учебные планы, *исключительную важность* формирования у молодёжи вероятностного мышления. Фактически при этом решается триединая задача. Во-первых, ориентация учащихся на реальные закономерности, на ситуации и системы, с которыми им придётся встречаться в жизни. Во-вторых, развитие мышления, овладение диалектикой необходимого и случайного. В-третьих, формирование атеистического мировоззрения. Напомним: либо бог, либо случай; либо разум творца, либо отбор информации из шума.

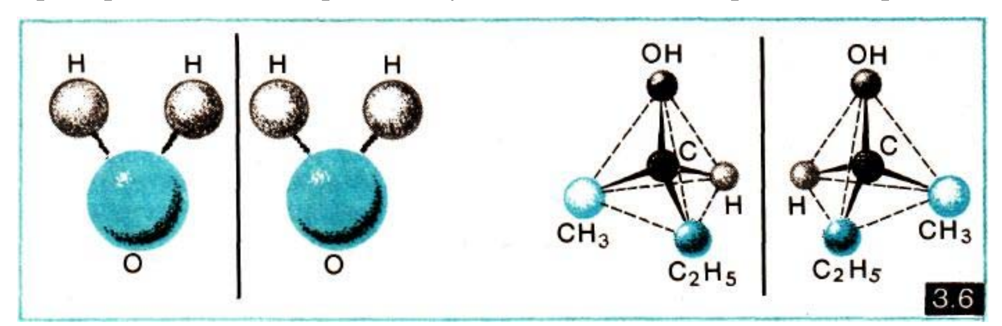
В заключение подчеркнём, что без рассмотрения вероятностных закономерностей предметы «Физика», «Химия», «Биология» принципиально нельзя считать *современными*. Современный школьный предмет должен отражать методологию современной науки.

§ 14. ОТ СИММЕТРИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ К СИММЕТРИИ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ

Что такое симметрия? У Л. Н. Толстого в «Отрочестве» (глава XIX) есть признание: «...Стоя перед чёрной доской и рисуя на ней мелом разные фигуры, я вдруг был поражён мыслью: почему симметрия приятна для глаз? Что такое симметрия? Это врождённое чувство, отвечал я сам себе. На чём же оно основано? Разве во всём в жизни симметрия?» Видный математик Г. Вейль (1885 – 1955); отмечал, что симметрия «является той идеей, посредством которой человек на протяжении веков пытался постичь и создать порядок, красоту и совершенство» [19, с. 37]. «Для человеческого разума симметрия обладает, по-видимому, совершенно особой притягательной силой, — писал Р. Фейман. — Нам нравится смотреть на проявление симметрии в природе, на идеально симметричные сферы планет или Солнца, на симметричные кристаллы, на снежинки, наконец, на цветы, которые почти симметричны» [134, с. 72].

Итак, что же такое *симметрия?* Слово это греческое и переводится как «соразмерность, пропорциональность, одинаковость в расположении частей». «Мы видим, — пишет Н. Ф. Овчинников в работе «Симметрия — закономерность природы и принцип познания», — что равносторонний треугольник лучше организован, более правилен, чем разносторонний, а последний более организован, чем пятно. Эту большую организованность, большую уравновешенность фигуры и выражает термин «симметрия» [97, с. 11]. Часто проводятся параллели: симметрия и уравновешенность, симметрия и гармония, симметрия и совершенство. Согласно современным представлениям, симметрию можно определить примерно так: «Симметричным называется такой предмет, который можно как-то изменять, получая в результате то же, с чего начали» [134, с. 72]. Таким образом, *симметрия предполагает неизменность объекта (каких-то свойств объекта) по отношению к каким-нибудь преобразованиям, каким-нибудь операциям, выполняемым над объектом*.

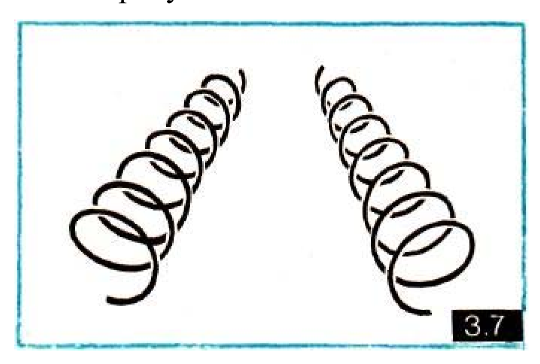
Так, бабочка симметрична по отношению к отражению в воображаемом зеркале, разделяющем бабочку пополам вдоль её туловища. Квадрат симметричен по отношению к повороту на 90°. Бордюр симметричен по отношению к смещению (переносу) вдоль него на определённое расстояние. В первом примере мы встречаемся с *зеркальной* симметрией, во втором — с *поворотной*, в третьем — с *переносной*, или *трансляционной*. Различные виды симметрии подробно описаны во многих книгах; советуем читателю познакомиться с ними, например, по книге автора «Этот удивительно симметричный мир» [119].



Живое и неживое с точки зрения симметрии; проблема возникновения жизни. На рисунке 3.6 изображены пространственные модели двух молекул — воды и вторичного бутилового спирта; там же показаны их зазеркальные двойники. Между рассматриваемыми молекулами есть принципиальное различие: молекула воды совпадает со своим зеркальным образом, а молекула спирта не совпадает. Никакими перемещениями и поворотами нельзя совместить молекулу спирта с её зазеркальным двойником; они отличаются подобно тому, как отличаются друг от друга левая и правая перчатки, левый и правый ботинки, левый и правый винты и т. п. Если молекулу спирта условно назвать «левой», то

зеркально отраженную молекулу следует назвать «правой». «Левую» и «правую» молекулы химики называют *стереоизомерами*. Молекулы-стереоизомеры имеют одинаковый атомный состав, одинаковые размеры, более того, одинаковую пространственную структуру — и в то же время они различны, поскольку *зеркально асимметричны*. Свойство зеркальной асимметричности (свойство, проявляющееся в том, что объект оказывается нетождественным со своим зеркальным образом) называют *киральностью* — от греческого «кир», что означает «рука». Молекула вторичного бутилового спирта — пример киральной молекулы.

Существенно, что молекулы, из которых построены *живые организмы*, зеркально асимметричны, т. е. киральны. Они подобны «винтам», а во многих случаях просто похожи на винты (например, двойная спираль молекулы ДНК). Более того, эти молекулы встречаются в природе лишь в каком-то одном варианте — либо «левом», либо «правом» (*кирально чистые* молекулы). Так, двойная спираль молекулы ДНК всегда *правая*: если смотреть вдоль её оси, то при движении по винтовой линии по часовой стрелке точка будет удаляться от наблюдателя. На рисунке 3.7 показаны левая и правая спирали.


3.7

Луи Пастер (1822 – 1895) первый обратил внимание на то, что если в неживой природе молекулы либо зеркально симметричны, либо одинаково часто встречаются в «левом» и «правом» вариантах, то в живых организмах зеркально-асимметричные молекулы встречаются в виде только определённой киральности — левой или правой. Пастер, а затем В. И. Вернадский полагали, что именно здесь *проходит граница между химией живой и неживой природы*. Можно сказать, что в отличие от неорганических объектов живые организмы построены из «винтов», причём винты одного типа только левые, а другого только правые. *Специфика живой материи — киральная чистота молекул*. «Одна из наиболее замечательных черт жизни, — читаем мы в великолепной популярной книге М. Гарднера, — это способность организма извлекать из окружающей среды химические соединения, молекулярная структура которых по большей части симметрична, и изготовлять из них правые и левые асимметричные соединения углерода. Растения, например, используют симметричные неорганические соединения вроде воды и углекислого газа и превращают их в асимметричные молекулы крахмала и сахара... Тела всех живых существ насыщены асимметричными углеродными молекулами, а также асимметричными спиралями белков и нуклеиновых кислот» [28, с. 135].

Человек построен из молекул определённой киральности (для одних видов молекул левой, для других правой). Потребляемая человеком органическая пища также построена из молекул определённой киральности. Ясно, что киральность молекул пищи *согласуется* с киральностью молекул человеческого организма (подобно тому как правые гайки «согласуются» с правыми болтами, а левые — с левыми). А что будет, если киральность молекул нашей пищи вдруг изменится? Такая пища будет для нас уже непригодна (как непригодны левые гайки для правых болтов), она может оказаться *биологически ядовитой*. Современная химия в ряде случаев искусственно получает зеркально отражённые стереоизомеры; их действие на человеческий организм оказывается совершенно иным по сравнению с действием природных стереоизомеров. Так, «отражённый» стереоизомер витамина С не воспринимается организмом. Небольшая добавка в пищу фенилаланина, приго-

товленного из имеющихся в природе веществ, не вызывает неприятных последствий; добавка же «отражённого» фенилаланина приводит к резкому нарушению обмена веществ, сопровождающемуся умопомешательством.

В известной детской книге Л. Кэрролла «Алиса в Зазеркалье» есть такая сценка. Собираясь «пройти» сквозь зеркало в скрытый за ним зазеркальный мир, Алиса обращается к своему котёнку с вопросом: «Но понравится ли тебе в Зазеркалье, киска? Дадут ли тебе там молочка? Может быть, молоко в Зазеркалье не годится для питья?» Действительно, в состав молока входит много зеркально-асимметричных соединений — жиры, лактоза (тип сахара), белки. При «переходе» из обычного мира в зазеркальный все асимметричные молекулы должны были бы превратиться из одних стереоизомеров в другие («отражённые»); в результате зазеркальное молоко должно было бы отличаться от обычного. Впрочем, при «переходе» в Зазеркалье и Алиса, и её котёнок сами превращаются в своих зазеркальных двойников. А в таком случае зазеркальное молоко будет для них, конечно, столь же вкусным и полезным, каким было раньше обычное («неотражённое») молоко.

С вопросами зеркальной симметрии-асимметрии на молекулярном уровне тесно связана проблема *возникновения жизни на Земле* — ведь живая материя возникла в своё время из неживой. Это возникновение обусловлено *нарушением существовавшей до того зеркальной симметрии*, образованием кирально чистых молекул. Воспроизведение и поддержание в дальнейшем этой киральной чистоты есть важнейшая функция жизнедеятельности. Современная наука пришла к выводу, что переход от мира зеркально-симметричных соединений к кирально чистому миру произошел не в процессе длительной эволюции, а *скачком* — в виде своеобразного *Большого биологического взрыва*. Это была бифуркация, акт самоорганизации материи (см. § 13). Л Л. Морозов (1946 – 1984) — один из активных исследователей проблемы возникновения жизни в результате нарушения зеркальной симметрии — писал: «Анализ условий, которые физический мир мог обеспечить для нарушения зеркальной симметрии, привёл нас к достаточно сильному утверждению: эволюционные процессы не способны обеспечить возникновение наблюдаемого кирально чистого состояния биосферы. Генезис этого состояния связан не с устойчивой эволюцией органического вещества, а с катастрофой, т. е. достижением развивающейся средой критической точки, за которой теряется устойчивость прежнего, симметричного состояния... На каком-то этапе перехода материи к живой форме должен быть аналог “Большого взрыва” — “Биологический большой взрыв”!» [77, с. 47 – 48].

Обобщение понятия симметрии. До сих пор мы говорили о симметрии в обычном *геометрическом* смысле — как о симметрии геометрических форм или, иными словами, *симметрии положений*. Современное понятие симметрии значительно шире: оно *не ограничивается* рассмотрением неизменности объектов по отношению к геометрическим преобразованиям — отражениям, поворотам, переносам.

Приведём ряд примеров. Предположим, что все электроны одного атома поменялись с электронами другого атома. Поскольку электроны тождественны (любой наугад выбранный электрон ничем не отличается от мириадов других электронов), то от обмена электронов никаких изменений в атомах не произойдет. Это есть симметрия. Обратимся к растениям. Переходя от одного поколения данного растения к другому, будем наблюдать сохранение определённых свойств. Так, из семечка вырастает новый подсолнух (подсолнечник) с таким же огромным соцветием-корзинкой, так же исправно поворачивающимся к солнцу. Это тоже есть симметрия, её обычно называют наследственностью. Прожив в некоторой местности год, мы убеждаемся, что климатические условия, особенности погоды оказываются такими же, какими они были тогда, когда мы сюда приехали. И это есть симметрия. Число ударных слогов остаётся неизменным при переходе от одной строки стихотворения к другой. И тут симметрия.

Итак, понятие симметрии имеет определённую «структуру», состоящую из трёх факторов: 1) *объект* или *явление*, симметрия которого рассматривается, 2) *изменение (преобразование)*, по отношению к которому рассматривается симметрия, 3) *инвариантность*

(неизменность, сохранение) каких-то свойств объекта, выражающая рассматриваемую симметрию. Подчеркнём: инвариантность существует не сама по себе, не вообще, а лишь по отношению к определённым преобразованиям. С другой стороны, изменения (преобразования) представляют интерес постольку, поскольку что-то при этом сохраняется. Иными словами, без изменений не имеет смысла рассматривать сохранение, равно как без сохранения исчезает интерес к изменениям. Симметрия выражает сохранение чего-то при каких-то изменениях или, иначе, сохранение чего-то несмотря на изменения. Таким образом, *понятие симметрии основывается на диалектике сохранения и изменения*.

Получается, что с симметрией мы встречаемся не только, когда наблюдаем симметричные формы, но и всякий раз, *когда при каких-то изменениях что-то остаётся инвариантным*, что-то сохраняется. Строго говоря, мы имеем дело с симметрией ещё чаще — всякий раз, как употребляем какой-либо *термин*, пользуемся какой-либо *абстракцией*. Возьмём, например, колесо. Конечно, оно обладает хорошо наблюдаемой геометрической симметрией. Но есть и более глубокая симметрия: колесо как объект, как понятие сохраняется со временем. Чтобы пояснить мысль, возьмём другой пример. Некоторые жители Севера называют тюленя в воде одним словом, а тюленя на льдине — другим. Но ведь это один и тот же объект — просто он находится в разных состояниях. Поэтому появляется единый термин — «тюлень», не зависящий от того, где пребывает данный объект: в воде или на льдине. Допуская, что приведённый пример покажется читателю примитивным, проиллюстрируем то же самое, обратившись к физике. В своё время было установлено, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Позднее физики обнаружили, что протон и нейтрон в известном смысле похожи на мокрого и сухого тюленя, что с точки зрения сильного взаимодействия они представляют собой попросту два состояния одной частицы — эта симметрия привела к появлению новой физической величины, названной изотопическим спином, а для протона и нейтрона было предложено общее «имя» — нуклон.

Симметрия физических законов. Из сказанного выше ясно, что понятие симметрии может относиться к любому объекту. Для нас особое значение имеет такой объект, как *физический закон*. Напомним слова В. И. Ленина: «Закон есть идентичное в явлениях» [5, с. 136]. Проиллюстрируем их на конкретном примере. Предположим, что мы находимся в физической лаборатории. Берём электрический провод с некоторым определённым сопротивлением, прикладываем электрическое напряжение и наблюдаем явление — по проводу течёт определённый ток. Мы можем многократно наблюдать данное явление — с разными проводами, сопротивлениями, гальваническими элементами. И всякий раз будем иметь нечто *идентичное*, нечто *неизменное*, нечто *инвариантное* — это нечто выражается *законом Ома*: $I = V / R$. Таким образом, в самом понятии физического закона (и не только физического) заложена симметрия, что и выражают приведённые выше слова В. И. Ленина.

Однако этим вопрос о симметрии физических законов *не исчерпывается*. То или иное явление можно исследовать в разных городах, в разное время, в разных инерциальных системах отсчёта. И всякий раз будем иметь один и тот же закон — то же самое идентичное, неизменное. Инвариантность законов природы по отношению к переносам во времени и пространстве была осознана ещё в XVII в. Спиноза (1632 – 1677) писал: «Законы и правила природы, по которым всё происходит и изменяется из одних форм в другие, везде и всегда одни и те же» [113, с. 455]. Рассмотрим различные свойства симметрии физических законов.

1. *Симметрия по отношению к переносам во времени* означает, что законы природы со временем не меняются. Если бы этой симметрии не было, то тогда одна и та же причина сегодня приводила бы к одним следствиям, а завтра — к другим. К счастью, можно не беспокоиться. Открытый ещё в III в. до н. э. закон Архимеда прекрасно «работает» и в наше время; законы для идеальных газов, установленные в XVIII в., законы электромагнетизма, полученные в XIX в., равно как и остальные законы, широко применяются в современной науке и технике.

Имея в виду симметрию физических законов относительно переносов во времени, го-

ворят об *однородности времени.* Это означает, что все моменты времени физически равнозначны, любой из них может быть выбран в качестве начала отсчёта. Однако, может заметить читатель, разве не является физически выделенным момент Большого взрыва? Разве, проснувшись где-то в далёком будущем и измерив средние расстояния между галактиками, мы не могли бы узнать, в каком именно времени мы очутились? На эти вопросы следует ответить утвердительно. Но в таком случае разве не следует считать, что, строго говоря, законы природы всё же зависят от времени? На этот вопрос мы сегодня ответить не можем. Ясно, что на достаточно больших интервалах времени (безусловно включающих в себя всё время существования цивилизации) можно с большой точностью считать время однородным. Более того, учёные рискнули применить известные им законы, чтобы проанализировать эволюцию Вселенной на гораздо более длительных промежутках времени — от наших дней до малых долей первой секунды существования Вселенной. Стройность и логичность получающейся при этом картины глобальной эволюции свидетельствуют об оправданности такого риска.

2. *Симметрия по отношению к переносам в пространстве* означает, что законы природы не зависят от выбора места — они одинаковы в Москве и Вашингтоне, на Земле и на Луне, в Солнечной системе и какой-нибудь далёкой галактике. Имея в виду эту симметрию физических законов, говорят об *однородности пространства*, т. е. физической равнозначности всех точек пространства.

Заметим, что без симметрии по отношению к переносам во времени и переносам в пространстве фактически нельзя было бы говорить о самом существовании каких-либо законов природы. «Инвариантность законов природы относительно сдвигов в пространстве и времени служит почти необходимой предпосылкой того, что мы можем открывать корреляции между событиями, т. е. законы природы» [21, с. 36].

3. *Симметрия по отношению к поворотам в пространстве* означает, что в пространстве нет физически выделенных направлений — *пространство изотропно*. Надо сказать, что идея изотропности пространства давалась человечеству с немалым трудом. Когда-то люди думали, что Земля плоская и, значит, вертикальное направление абсолютно. Долгое время Земля считалась центром мироздания, поэтому равноценными были не все вообще направления, а только те, которые проходят через центр Земли. Перенесение центра мира с Земли на Солнце сохраняло физическую неравноценность направлений. И только отказ от каких бы то ни было «центров мироздания» согласуется с идеей изотропности пространства.

4. *Симметрия по отношению к переходу из одной инерциальной системы отсчета в другую* есть не что иное, как сформулированный А. Эйнштейном *принцип относительности*. Эта симметрия законов природы составляет сущность специальной теории относительности, установившей физическую равнозначность всех инерциальных систем отсчета (см. § 6). «Независимость законов природы от состояния движения, коль скоро оно продолжает оставаться равномерным, вовсе не очевидна для неподготовленного ума, — писал Вигнер. — Одним из её следствий является то обстоятельство, что законы природы определяют не скорость, а ускорение тела: скорость различна в системах, движущихся с разными скоростями, ускорение же одинаково, коль скоро системы движутся относительно друг друга равномерно и прямолинейно. Поэтому принцип эквивалентности таких систем не мог быть установлен до того, как был понят второй закон Ньютона. После открытия второго закона этот принцип был сразу же осознан самим Ньютоном. Правда, одно время доверие физиков к принципу независимости законов природы от состояния равномерного и прямолинейного движения было подорвано существованием некоторых электромагнитных явлений, но затем Эйнштейн возродил принцип в несколько изменённой редакции» [21, с. 25].

Как отмечалось ранее, преобразования Лоренца могут рассматриваться, как поворот в четырёхмерном пространственно-временном континууме (см. § 6). Отсюда следует, что симметрия законов природы относительно перехода из одной инерциальной системы в

другую представляет собой *обобщение* симметрии по отношению к поворотам. Просто здесь рассматриваются повороты не в обычном трёхмерном пространстве, а в четырёхмерном континууме.

5. *Симметрия относительно зеркального отражения* означает, что физические законы не меняются *при замене левого на правое, а правого на левое*. Две физические установки, одна из которых построена как зеркальное отражение другой, будут функционировать одинаково. «Отражённый» телевизор, «отражённая» электрическая схема, «отражённая» оптическая система будут работать точно так же, как обычный телевизор, обычная схема, обычная система. «Отражённые» часы будут так же хорошо показывать время, как и обычные часы; вот только стрелки их будут вращаться в другую сторону и соответственно иначе будет выглядеть циферблат. Можно предложить наглядную демонстрацию зеркальной симметрии физических законов. Допустим, что мы сидим в кинозале, задняя стена которого заменена большим плоским зеркалом. Если мы повернёмся спиной к экрану и будем смотреть фильм в зеркале, то никаких необычных с точки зрения физики явлений мы при этом не обнаружим. Правда, на зазеркальном экране трудно будет прочитать надписи, попадающие в кадр, и знакомый пейзаж или улица будут казаться не совсем знакомыми. Однако этот эффект неузнавания, связанный с заменой левого на правое, не имеет никакого отношения к физическим законам.

До 1956 г. физики ставили симметрию по отношению к отражению в один ряд с рассмотренными ранее симметриями; они были убеждены, что симметрией относительно отражения обладают все без исключения физические законы. В 1956 г. американские физики Т. Ли (р. 1926) и Ч. Янг (р. 1922) выдвинули предположение, что инвариантность физических законов по отношению к зеркальному отражению может нарушаться в явлениях, обусловленных слабым взаимодействием, например при β-распаде атомных ядер. В 1957 г. это предсказание было подтверждено прямым экспериментом. К великому удивлению физиков оказалось, что зеркальная симметрия есть не во всех физических законах, что в некоторых явлениях природа обнаруживает лево-правую асимметрию. В том же году Л. Д. Ландау (1908 – 1968) показал, что симметрия восстанавливается, если одновременно с отражением в зеркале произвести замену всех частиц на их античастицы. Подробнее обо всём этом см., например, в [28, 73, 119, 131].

Пример асимметрии физических законов. Может показаться, что законы природы инвариантны по отношению к любым преобразованиям. Это не так. Законы природы *неинвариантны* относительно, например, *преобразования подобия*, т. е. преобразования, связанного с изменением пространственного масштаба. *Геометрический принцип подобия неприменим к физическим законам*.

Надо признать, что идея подобия весьма прочно укоренилась в человеческом сознании; она широко используется не только в литературе, но и в техническом творчестве. Свифт посылал своего Гулливера сначала в Лилипутию, а затем к великанам в Бробдингнег. Всем нам с детства знакомы Дюймовочка и мальчик с пальчик. Мы знаем, что аэродинамические и гидродинамические конструкции предварительно испытывают на их пропорционально уменьшенных моделях.

Известно, однако, что сколь-либо значительное уменьшение размеров конструкции или устройства при таких испытаниях недопустимо. Ещё Галилей догадался, что законы природы несимметричны относительно изменения масштаба. К этому выводу он пришёл, размышляя о прочности костей животных при увеличении их размеров. Чтобы огромный великан имел пропорции нормального тела, необходимо значительно увеличить прочность его костей. В противном случае тело его будет раздавлено и сломано собственной тяжестью. Р. Фейнман приводит наглядный пример с моделью какого-нибудь собора, сложенной из множества спичек. Если эту модель пропорционально увеличить до натуральных размеров собора, то строение развалится под собственной тяжестью. Возможно, кто-нибудь неосмотрительно заметит, что надо было бы соответствующим образом увеличить также размеры Земли. Однако в таком случае возрастёт сила тяжести — собор ещё

скорее развалится.

С точки зрения современной физики отсутствие симметрии физических законов относительно преобразования подобия объясняется просто и исчерпывающе — *порядок размеров атома имеет абсолютное, одинаковое для всей Вселенной значение* (10^{-10} м). Отсюда, между прочим, видно, что если попробовать уменьшить линейные размеры деталей некоторой реальной физической установки объёмом 0,1 $м^3$, скажем, в миллиард раз, то в нашем распоряжении останется всего около ста атомов! Ясно, что никакой установки из такого малого числа атомов создать нельзя.

Рассматриваемая *асимметрия физических законов* — хороший пример *перехода количественных изменений в качественные*. Переходя от обычных масштабов к масштабам микромира, мы покидаем область классической механики и вступаем во владения квантовой механики.

Симметрия физических законов и законы сохранения. Немецкий математик Эмми Нётер доказала в 1918 г. теорему, сущность которой заключается в утверждении, что *различным симметриям физических законов соответствуют определённые законы сохранения* (мы уже упоминали об этом в диалоге «О времени»). Тем самым была математически доказана связь между законами сохранения и симметрией законов природы. По выражению Фейнмана, «среди наиболее мудрейших и удивительнейших вещей в физике эта связь — одна из самых интересных и красивых». Её можно сформулировать следующим образом.

Закон сохранения энергии есть следствие однородности времени или, иначе говоря, следствие симметрии законов природы по отношению к переносам во времени. *Энергия*, таким образом, может быть определена как физическая величина, сохранение которой обусловлено указанной симметрией.

Закон сохранения импульса есть следствие однородности пространства (следствие симметрии законов природы по отношению к переносам в пространстве). *Импульс* — физическая величина, сохранение которой связано с однородностью пространства.

Закон сохранения момента импульса есть следствие изотропности пространства (следствие симметрии законов природы по отношению к поворотам). *Момент импульса* — величина, сохранение которой связано с изотропностью пространства.

Трёхмерность пространства предопределяет *векторную* природу импульса и момента импульса; законы сохранения этих величин — векторные законы. Одномерность времени предопределяет *скалярную* природу энергии и соответствующего закона сохранения.

«Тот факт, что закон сохранения энергии вытекает из однородности времени, означает, что течение времени само по себе не может вызвать изменение физических состояний системы. Связь закона сохранения импульса со свойством однородности пространства означает, что перемещения системы недостаточно для изменения её состояния; последнее может произойти только в результате взаимодействия данной системы с другими системами. Связь закона сохранения момента импульса со свойством изотропности пространства означает, что поворот системы в пространстве не изменяет её свойств» [33, с. 191].

В классической механике законы сохранения выводят из законов движения. Так, для получения закона сохранения импульса используют третий и второй законы Ньютона. Однако законы сохранения могут быть получены не на основе законов движения, а непосредственно из принципов симметрии. Область применимости законов сохранения шире, нежели область применимости тех или иных законов движения. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса применяются не только в классической механике, но и в квантовой; в то время как законы динамики Ньютона в квантовой механике не работают. «Для тех, кто выводит законы сохранения из принципов инвариантности, — отмечает Ю. Вигнер, — ясно, что область применимости этих законов выходит за рамки любых частных теорий (гравитации, электромагнетизма и т. д.), практически обособленных друг от друга в современной физике» [21, с. 54]. Очевидно, что область применимости законов сохранения должна быть столь же широка, как и область применимости соответствующих

принципов инвариантности. Это даёт основание считать законы сохранения универсальными законами.

В заключение заметим: с симметрией законов природы относительно отражения или замены частиц на античастицы также связаны определённые *законы сохранения*. С первой симметрией связано сохранение физической величины, называемой *пространственной чётностью*, а со второй — сохранение величины, называемой *зарядовой чётностью*. Оба этих закона сохранения не вполне универсальны, поскольку соответствующие им симметрии нарушаются в слабых взаимодействиях.

Диалог. Об использовании понятия симметрии при обучении физике



Автор. Я ещё раз перелистал школьные учебники по физике в поисках хоть какого-то упоминания о симметрии, внимательно посмотрел, как рассматриваются законы сохранения в «Физике-9» и кристаллические тела в «Физике-10». Нигде слово «симметрия» даже не приводится. Только в «Физике-11» удалось найти это слово — в § 109 есть раздел «Кварк-лептонная симметрия», где об указанной симметрии сказано следующее: «Существует *кварк-лептонная симметрия*, которая выражается в том, что в природе встречается *шесть лептонов*, а все сильно взаимодействующие частицы состоят из *шести кварков*» [83, с. 289]. Вот и всё.

Учитель. В школе основное внимание традиционно уделяется *фактической* стороне дела — конкретным понятиям, явлениям, законам, умению пользоваться формулами, решать задачи. Что же касается *осмысления* предлагаемого фактического материала, обращения к общим принципам, к философии, то всё это остаётся за рамками школьного курса физики. Наверное, поэтому понятие симметрии и не используется в процессе преподавания физики в школе.

Автор. В одной очень интересно написанной (и весьма полезной для учителя) книге я вычитал о Максвелле следующее: «В одном из писем к отцу тринадцатилетний Джеймс сообщает как бы невзначай, что он сделал из картона тетраэдр, додекаэдр и два других «эдра» (т. е. правильных многогранника), названий которых он не знает. Казалось бы, ничего особенного, но вот что знаменательно: примерно с этого времени товарищи стали замечать, что Максвелл, до той поры довольно равнодушный к учёбе, вдруг почувствовал к ней интерес. Его фантазия, подобно фантазии древних греческих геометров, была захвачена этими образцами совершенной симметрии. Красота натолкнула на путь познания» [76, с. 95 – 96]. Симметрия не только натолкнула юного Максвелла на путь познания, но и впоследствии подсказала ему идею *тока смещения*, которая привела его к знаменитым

уравнениям для электромагнитного поля. Я здесь имею в виду, конечно, не симметрию геометрических фигур (многогранников), а симметрию явлений — *симметрию между электричеством и магнетизмом*.

Учитель. Кстати, в учебнике «Физика-11» об этом кое-что сказано: «Изучая свойства электромагнитного поля, Максвелл задался вопросом: если переменное магнитное поле порождает электрическое поле, то не существует ли в природе обратного процесса? Не порождает ли переменное электрическое поле в свою очередь магнитное? Это соображение, диктуемое уверенностью в единстве природы, во внутренней стройности и гармонии законов природы, составляет основу гипотезы Максвелла» [83, с. 94].

Автор. Сказано в целом неплохо, но слабовато: плодотворная идея симметрии растворилась здесь в гладкой фразе «уверенность в единстве природы, во внутренней стройности и гармонии законов природы». Мне непонятно, что такое «внутренняя стройность» законов природы и в чём именно выражается их «гармония». Вместо всего этого следовало бы говорить о симметрии законов природы. И говорить не только здесь, а уже в IX классе, когда изучались законы сохранения.

Учитель. Конечно, рассмотрение законов сохранения без обращения к симметрии не может убедить учащихся в исключительной важности этих законов. Почему, собственно говоря, мы так *уверены* в законах сохранения? Почему мы уверены, что энергия и импульс *обязательно* должны сохраняться? Обращаясь к симметрии, мы даём убедительный ответ на эти вопросы: *у нас есть уверенность, что время и пространство однородны*. Именно поэтому мы и не сомневаемся в справедливости законов сохранения энергии и импульса.

Автор. Являясь следствием пространственно-временной симметрии законов природы, законы сохранения выполняют в процессе обучения физике важную *методологическую функцию* — они демонстрируют условность перегородок между различными разделами предмета «Физика». Они работают *везде* — в механике, разделе, посвящённом тепловым явлениям, электродинамике, квантовой физике. Один думающий десятиклассник как-то задал мне такой вопрос. Ясно, что ни электрон, ни фотон не похожи на биллиардные шары. Почему же в таком случае мы пользуемся при рассмотрении эффекта Комптона законами сохранения энергии и импульса, как если бы перед нами были упруго соударяющиеся шары? Его вопрос родился по той причине, что оба закона сохранения были выведены в механике.

Учитель. Но можно ли иначе их выводить, оставаясь в рамках школьной физики?

Автор. Я совсем не против того, чтобы выводить их, используя законы динамики Ньютона. Но необходимо при этом объяснить, что в действительности законы сохранения *значительно шире*, что они связаны с симметрией законов природы и именно это предопределяет широкое поле их применения. Так, закон сохранения импульса применим при рассмотрении и биллиардных шаров, и электромагнитного поля, и фотонов, хотя сам импульс при этом выражается по-разному. В первом случае: $\vec{p} = m\vec{v}$ (это есть импульс тела массы m, движущегося со скоростью $\vec{v}$), во втором: $\vec{p} = \frac{\vec{E} \times \vec{H}}{c^2}$ (импульс единицы объёма поля, характеризующегося напряженностями $\vec{E}$ и $\vec{H}$), в третьем: $\vec{p} = \vec{n}\frac{h\nu}{c}$ (импульс фотона с энергией $h\nu$, движущегося в направлении, которое задаёт единичный вектор $\vec{n}$).

Учитель. Законы сохранения проходят красной нитью не только через всю физику, но и через все естественные науки. И химики, и биологи широко пользуются законом сохранения энергии.

Автор. Это естественно коль скоро в основе лежит симметрия законов природы. До сих пор мы, говоря о законах природы, имели в виду физические законы. Но это просто из-за того, что книга адресована учителям физики. На самом деле законы природы, конечно, не ограничены рамками физики.

Учитель. Мне нравится подход к законам сохранения, опирающийся на симметрию

законов природы. А как быть в данном случае с хорошо известным школьникам *законом сохранения электрического заряда*? С какой симметрией связан этот закон сохранения?

Автор. Физики называют эту симметрию калибровочной инвариантностью. Весьма упрощённо (на уровне средней школы) её можно представить как симметрию физических законов по отношению к изменению значения потенциала электрического поля. Ведь Вы учите, что физический смысл имеет не сам потенциал, а разность потенциалов (к потенциалу можно добавлять произвольное значение). Вот отсюда и следует, как оказывается, закон сохранения электрического заряда.

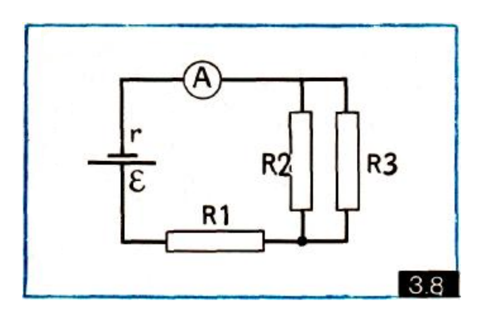
Учитель. Как я понимаю, симметрия в школьной физике не ограничивается законами сохранения?

Автор. Конечно. Её надо увидеть и выделить во всех разделах физики. Я бы разграничил симметрию, «лежащую на поверхности», и симметрию, «лежащую в глубине». На «поверхности» лежат многочисленные проявления симметрии в рассматриваемых объектах и явлениях; это симметрия структур, симметрия графиков процессов. Примеры: симметрия траектории тела, брошенного под углом к горизонту (с ней связано равенство модулей вертикальной проекции скорости тела в момент бросания и в момент падения, а значит, и равенство времён подъёма и падения), симметрия графика плавления и кристаллизации твёрдого тела, симметрия кристаллических тел, симметрия между частицами и античастицами (в отношении их свойств, но отнюдь не распространённости в нашей Вселенной), симметрия поведения во времени закрытой модели Вселенной и т. д. Сюда же относятся: симметрия формул, описывающих кинематику и динамику поступательного движения и движения вращательного; симметрия выражений для закона всемирного тяготения и закона Кулона; симметрия между механическими и электрическими колебаниями.

Учитель. Последние симметрии, наверное, лучше называть *аналогиями*.

Автор. Думаю, что слово «симметрия» точнее. Вы переходите от поступательного движения к вращательному, но структура формул при этом остаётся прежней. Разве это не инвариантность? Но пойдём дальше. Ещё более интересна симметрия, которая была названа выше «лежащей в глубине». Её можно усмотреть в содержании любого физического закона. Возьмём для примера второй закон Ньютона. Допустим, мы хотим заняться с учащимися выяснением внутреннего смысла этого закона. Зададим им вопрос: что было бы, если бы вместо *ускорения* в этом законе стояла *скорость*? В процессе обсуждения выявятся два принципиальных момента. Во-первых, в этом случае утратилась бы причинная связь, прошлое не влияло бы на настоящее, а настоящее не влияло бы на будущее — ведь скорость в данный момент определялась бы полностью силой, действующей на тело в этот момент. Во-вторых, в рассматриваемом случае скорость приобрела бы абсолютный смысл — и тем самым исчезла бы симметрия между разными инерциальными системами отсчёта (исчез бы принцип относительности). Последнее обстоятельство уже отмечалось в приводившемся в § 14 высказывании Ю. Вигнера. Ещё один пример — закон всемирного тяготения и закон Кулона. В обоих законах в знаменателе стоит квадрат расстояния между взаимодействующими агентами (обладающими массой в одном случае и зарядом в другом). Оба закона инвариантны относительно переносов в пространстве — ведь переносы не изменяют расстояние между телами или зарядами (при переносе оба тела или оба заряда сдвигаются одновременно).

Учитель. Можно добавить, что, хотя оба этих закона сформулированы для точечных масс (зарядов), однако их можно применять для тел конечных размеров, если тела имеют сферическую форму вследствие симметрии.



Автор. Использование симметрии при обучении физике позволяет глубже разобраться в изучаемых явлениях и законах. Кроме того, симметрия может использоваться при решении различных практических вопросов. Например, для проверки правильности тех или иных выражений. На рисунке 3.8 показана электрическая цепь. Для силы тока, протекающего через резистор сопротивлением R_1, напишем такое выражение:

$$I = \frac{E}{r + \dfrac{R_1R_2 + R_2R_3}{R_2 + R_3}}$$

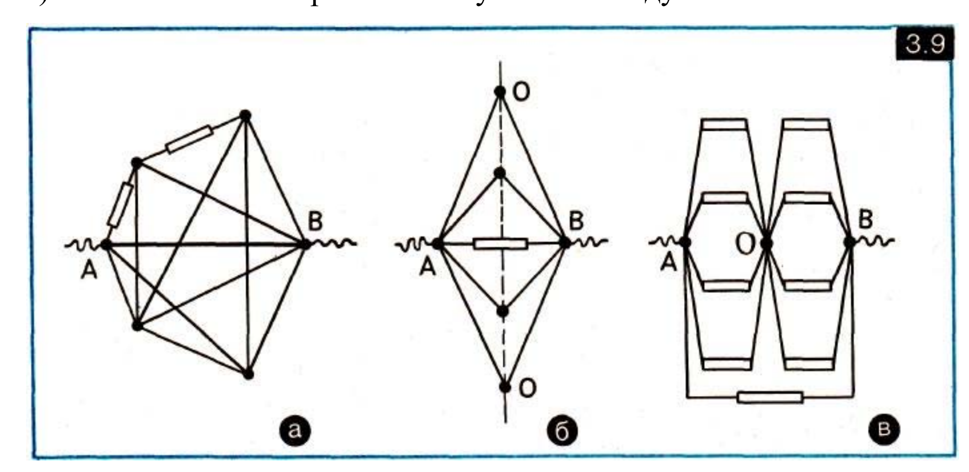
Верно ли это выражение?

Учитель. Надо воспользоваться правилами определения сопротивления при параллельном и последовательном соединении проводников...

Автор. Простите, но это лишнее. Присмотритесь к рисунку — наша схема симметрична по отношению к обмену местами R_2 и R_3; ясно, что при этом показание амперметра не должно измениться. Однако если в написанном выражении для силы тока заменить R_2 на R_3, а R_3 на R_2, то результат изменится. Значит, выражение неверно. В числителе дроби недостаёт слагаемого R_1R_3.

Учитель. Вот такое применение симметрии мне особенно по душе.

Автор. Симметрию можно и должно шире использовать при решении задач. При этом иногда очень сложная с виду задача решается необычайна просто. Вот пример подобной задачи (предлагалась на олимпиаде). Между точками *A* и *B* включен резистор сопротивлением *R*. Кроме того, имеются ещё $N-2$ точек, причём между каждой парой точек (включая и точки *A* и *B*) подсоединён резистор сопротивлением *R* (см. рис. 3.9, *а*, где для простоты $N=6$). Найти полное сопротивление участка между *A* и *B*.



Учитель. Я бы попробовал действовать методом индукции. Пусть сначала $N=2$, затем $N=3$, затем $N=4$ и т. д.

Автор. Вместо индукции используем симметрию. Разместим мысленно упомянутые $N-2$ точки на прямой *OO*, относительно которой точки *A* и *B* симметричны. Тем самым перейдём от несимметричного рисунка 3.9, *а* к симметричному (рис. 3.9, *б*). Из соображе-

ний симметрии ясно, что потенциалы всех точек на прямой *OO* одинаковы, поэтому данные точки можно соединить друг с другом — получится схема, показанная на рисунке 3.9, *в*. Теперь искомое сопротивление очень легко определить; оно равно $\frac{2R}{N}$.

Учитель. Надо побольше решать задач с использованием симметрии.

Автор. Примеры таких задач можно найти в [118]. Надо сказать, что идея широкого использования понятия симметрии при обучении физике в школе отнюдь не нова. Её пропагандировал ещё двадцать лет тому назад В. А. Фабрикант: «Во всех разделах классической физики, особенно при решении задач, следует обращать внимание на следствия, вытекающие из свойств симметрии. При этом стоит подвести ученика к более широкому пониманию понятия симметрии. Изучение свойств симметрии существенно не только в теории элементарных частиц. Это можно показать и в механике, и в электронике, и, наконец, в электромагнетизме» [128, с. 41].

Учитель. Идея носится в воздухе давно, а в нынешних учебниках слово «симметрия» до сих пор отсутствует. Как это понимать?

Автор. Вопрос не ко мне. Хотелось бы подчеркнуть, что сегодня *без широкого использования симметрии — симметрии объектов и симметрии физических законов — курс физики в школе не может рассматриваться как современный*. Более того, понятие симметрии надо широко применять и при изучении других предметов — математики, химии, биологии, географии.

Мы рассмотрели некоторые аспекты использования симметрии в школьной физике. Однако мы не остановились на, возможно, наиболее важном моменте. Я имею в виду философский аспект симметрии, или, точнее говоря, *диалектику симметрии и асимметрии*. Она лежит в основе любой *научной классификации*. Именно она определяет степень красоты, содержащейся в том или ином произведении искусства, зодчества.

Понимание диалектики симметрии и асимметрии крайне важно любому человеку независимо от характера его профессии. Остановимся на этом вопросе более подробно.

§ 15. ДИАЛЕКТИКА СИММЕТРИИ И АСИММЕТРИИ

Симметрия как проявление «мудрости творца». С давних времён симметрия форм, наблюдаемая в природе, производила на человека сильное впечатление. Он видел в симметрии *порядок, гармонию, совершенство*, вносимые всемогущим творцом в изначальный хаос. Напомним, что в учении пифагорейцев симметричным фигурам и телам придавался особый, мистический смысл.

Особенно восхищали наших далёких предков правильные многоугольники и правильные многогранники (платоновы тела). Древние греки весьма серьёзно воспринимали тот факт, что существует лишь пять платоновых тел (напомним рис. 1.2); в их представлении это были атомы, из которых построен весь мир: тетраэдр — атом огня, октаэдр — атом воздуха, куб — атом земли, икосаэдр — атом воды, додекаэдр — атом эфира.

Зашифрованная в Платоновых телах идея *божественной гармонии* увлекла Иоганна Кеплера (1571 – 1630) настолько, что он пытался связать эти пять тел с радиусами сфер (орбит) известных в то время шести планет. Взяв сферу Сатурна, Кеплер вписал в неё куб. В этот куб он вписал следующую сферу — сферу Юпитера. В сферу Юпитера был вписан тетраэдр, а в тетраэдр сфера Марса. В сферу Марса Кеплер вписал додекаэдр, а в него сферу Земли. Затем шли последовательно икосаэдр, вписанный в сферу Земли, сфера Венеры, октаэдр, вписанный в сферу Венеры, и, наконец, сфера Меркурия. Вычислив в соответствии со своей схемой относительные радиусы планетных сфер, Кеплер обнаружил, что отношения этих радиусов согласуются с данными наблюдений: $8:15:20:30:115:195$. Это удивительное совпадение, как казалось Кеплеру, подтверждало правильность геометрической схемы Вселенной, построенной на основе пяти платоновых тел. Всё это учёный изложил в книге, которой дал интригующее название «Космографическая тайна».

Убеждение в том, что симметрия есть не что иное, как проявление мудрости творца, просуществовало фактически вплоть до нашего столетия. Полагая, что мир представляет собой гигантский «часовой механизм», запущенный в действие богом, человек, естественно, верил в совершенство этого механизма. В симметрии, гармонии он усматривал доказательства совершенства.

Двадцатый век покончил с этой парадигмой. Очарование симметрией, мистическое преклонение перед ней сменилось пониманием действительного содержания симметрии.

Современный взгляд на симметрию: идея сохранения, выявление общего в объектах или явлениях, ограничение числа возможных вариантов. Обсуждая современный взгляд на симметрию, выделим три принципиальных момента. Во-первых, *симметрия связана с сохранением*. Она выделяет в нашем изменчивом, очень динамичном мире различные *инварианты*, своеобразные «опорные точки». Тем самым в мир вносится порядок. Этот мир наполнен взаимодействиями и превращениями, в нём, как известно, «всё течёт, всё изменяется», повсюду буйствуют случайности. Однако при всём том законы этого мира обнаруживают симметрию, а потому: что бы ни происходило, а энергия сохраняется. И не только энергия, но и ряд других физических величин. И не только физические величины. Например, несмотря на все изменения и капризы погоды, за летом неумолимо следует осень, а за ней зима.

Во-вторых, *симметрия выделяет общее как в объектах, так и в явлениях*. Мир *многообразен*, но в то же время он *един*; в его разнообразных проявлениях присутствуют черты общности. Так, законы сохранения, действуя в самых разных областях и различных конкретных ситуациях, выражают то общее для всех ситуаций, что, в конечном счёте, связано с соответствующими свойствами симметрии законов природы. Законы сохранения «безразличны» к специфике рассматриваемых ситуаций, они «безразличны» к конкретным механизмам взаимодействия, их область применимости выходит за рамки частных теорий.

Общий, универсальный характер законов сохранения, не требующий анализа деталей того или иного явления, предопределяет простоту этих законов и достоверность результатов, получаемых на их основе. Подчеркнём, что детали того или иного явления, особенности механизма взаимодействия часто нам неизвестны или известны приближённо; их учёт нередко связан с большими математическими трудностями. Поэтому простые и изящные законы сохранения выглядят крайне привлекательно. Исследуя то или иное явление, физик анализирует его прежде всего на уровне законов сохранения и лишь затем вступает при необходимости на тяжёлый путь изучения деталей. Многие явления исследованы в настоящее время лишь на уровне законов сохранения.

В последнем диалоге мы отмечали связь между симметрией и аналогией. Всеобщность метода аналогий, широко применяемого во всех без исключения науках, — это, по сути дела, всеобщность принципа симметрии. Физические модели тех или иных объектов или явлений создаются как раз на основе аналогий. Молекула ДНК моделируется как винт. Спин частицы моделируется в виде своеобразного волчка. Столкновение фотона с электроном в эффекте Комптона рассматривается по аналогии со столкновением биллиардных шаров. Аналогии между различными процессами позволяют описывать их общими уравнениями. Так, колебания маятника, колебания атомов в молекуле, колебания электромагнитного поля в контуре с ёмкостью и индуктивностью симметричны (аналогичны) в том смысле, что все эти процессы описываются одним и тем же математическим уравнением — дифференциальным уравнением гармонических колебаний. Одно и то же уравнение годится для описания процесса радиоактивного распада, процесса разрядки конденсатора, изменения с высотой плотности воздуха, уменьшения интенсивности светового пучка в среде (дифференциальное уравнение экспоненциального убывания). *Единство математической природы* рассматриваемых процессов, позволяющее считать их аналогичными, указывает на наличие глубокой симметрии.

Параллель *симметрия-общее* внутренне связана с уже проводившейся ранее параллелью *симметрия-сохранение*; недаром обе выходят на законы сохранения. Частности могут изменяться, но сохраняется общее. Здесь можно указать ещё одну параллель: *симметрия-тождество*. Например, нейтрон и протон обладают общим свойством: они одинаковым образом ведут себя в сильных взаимодействиях. Это можно понимать и так: они тождественны с точки зрения сильных взаимодействий. Отмеченная тождественность, или, иными словами, симметрия, означает, что ядерные силы не зависят от электрического заряда взаимодействующих частиц.

В-третьих, симметрия предопределяет необходимость: *она действует в направлении сокращения числа возможных вариантов*. Она ограничивает многообразие как структур, так и вариантов поведения систем. Это весьма принципиальное обстоятельство заслуживает особого внимания.

То, что симметрия ограничивает многообразие структур, хорошо видно уже на примере правильных многогранников — их всего пять. Симметрия накладывает ограничения на разнообразие структур молекул и кристаллов. Вселенная состоит из мириадов атомов. Однако, благодаря тому что все электроны во Вселенной тождественны (симметричны относительно взаимных перестановок), равно как тождественны все протоны и вообще все частицы одного и того же типа, все эти мириады атомов реализуют относительно малое число разных вариантов, систематизированных в Периодической системе элементов. В § 12 отмечалось, что законы сохранения представляют собой определённые *правила запрета*, налагаемые на процессы, происходящие в природе. Иными словами, возможны лишь те процессы, которые согласуются с законами сохранения. Например, закон сохранения энергии делает невозможным вечный двигатель, а закон сохранения импульса не позволяет самого себя поднять за волосы. Через посредство законов сохранения (законов запрета) симметрия исключает многие формально мыслимые варианты поведения систем и порой почти однозначно предписывает системе то или иное поведение.

Существенно, что симметрия не просто ограничивает число возможных вариантов, но

и во многих случаях подсказывает те варианты, которые возможны, т. е. *позволяет делать предсказания*. Вот ставшие уже классическими примеры подобных предсказаний. В 1869 г. Д. И. Менделеев предсказал существование и свойства скандия (ученый называл его экабором), галлия (экаалюминия), германия (экакремния). В 1931 г. В. Паули предсказал существование нейтрино. В 1961 г. М. Гелл-Манн предсказал существование и свойства омега-минус-гиперона.

Диалектика симметрии и асимметрии. Итак, с идеей симметрии оказываются органически связанными идеи *сохранения, общности, тождества, необходимости*. Но сохранение диалектически связано с *изменением*, общее — с *частным*, индивидуальным, тождественное — с *различным*, необходимое — со *случайным*. Диалектическую пару необходимое-случайное мы достаточно подробно обсуждали в § 13. О диалектике сохранения и изменения мы говорили, анализируя само понятие симметрии (см. § 14). Вполне понятна также диалектика общего-частного, тождественного-различного. Напомним в этой связи слова В. И. Ленина: «Закон есть идентичное в явлениях» (мы их уже использовали в § 14). Не имело бы смысла говорить об общих свойствах нейтрона и протона, если бы они как-то не различались. Общее существует не вообще, это есть общее различных объектов. Говорить же о различиях можно, лишь рассматривая объекты с общей позиции.

Всё это подводит нас к выводу: в мире существует не просто симметрия, а симметрия и асимметрия, и не просто существуют, а находятся в *диалектической взаимосвязи* (единство и борьба противоположностей). *Если симметрия связана с сохранением, общим, тождественным, необходимым, то асимметрия связана с изменением, частным, различным, случайным*. Мир не мог бы быть идеально (абсолютно) симметричным. В таком мире ничто бы не изменялось, не было бы никаких различий (ничто нельзя было бы выделить, отличить от остального); это означает, что в таком мире попросту ничего бы не наблюдалось — никаких явлений, никаких объектов. Точно так же не мог бы существовать абсолютно асимметричный мир. Это был бы мир без каких-либо законов, мир, где ничто не сохраняется, где нет каких-либо причинных связей, где всякая сущность сиюминутна и ни на что не похожа. Реальный мир — это мир, основывающийся на диалектике симметрии и асимметрии.

Когда-то симметрия была всего лишь *геометрическим* понятием (*симметрия положений*). Позднее это понятие существенно расширилось — наряду с симметрией положений стала рассматриваться также *симметрия явлений*, *симметрия законов природы*. Разработанная в начале XIX в. французским математиком Э. Галуа (1811 – 1832) *теория групп преобразований симметрии* (сокращенно: теория групп) нашла самое широкое применение в современной науке — квантовой физике, физике твёрдого тела, физике элементарных частиц и т. д. Сегодня происходит дальнейшее расширение понятия «симметрия» — оно приобретает глубокий *философский* смысл, рассматривается с точки зрения диалектики симметрии и асимметрии. Об этом пишет видный советский философ В. С. Готт: «В современной науке (физике, математике, химии, биологии и др.) широкое применение получило понятие симметрии, и мы думаем, что есть все основания рассматривать категорию симметрии уже не только как понятие естествознания, но и как философское понятие... На наш взгляд, включение категории симметрии в понятийный аппарат философии послужит не только для объяснения уже полученных знаний, но и будет играть всё возрастающую роль в дальнейшем развитии познания» [39, с. 240]. В. С. Готт подчёркивает: «...Одним из ярких проявлений закона единства и борьбы противоположностей является единство и борьба симметрии и асимметрии» [97, с. 42].

Диалектика симметрии и асимметрии в научном познании мира и в человеческом творчестве. Существует точка зрения, согласно которой в нашем знании о мире есть три последовательные ступени. На низшей ступени находятся *явления*, на следующей — *законы природы*, на третьей — *принципы симметрии*. Законы природы позволяют предсказывать явления, принципы симметрии позволяют предсказывать законы природы. Прогресс в научном познании мира основывается, в конечном счёте, на познании принципов

симметрии. С такой точкой зрения следует согласиться, но с одним существенным уточнением: говоря о принципах симметрии, необходимо иметь в виду не просто симметрию, а симметрию в диалектической взаимосвязи с асимметрией. Было бы неправильно полагать, что процесс научного познания сводится к открытию новых симметрий, что это есть путь, в конце которого мы отыщем, наконец, «универсальные уравнения» и создадим «единую теорию», дающую полное описание мира. «Физики гонятся за симметрией подобно тому, как путники преследуют в пустыне ускользающий мираж. Вот возникла на горизонте прекрасная манящая картина, но как только вы пытаетесь к ней приблизиться, она исчезает, оставляя чувство горечи» [76, с. 175]. Конечно, мы не можем не видеть развитие глобального процесса *интеграции научного знания* — объединение электричества, магнетизма и оптики во второй половине XIX в., создание теории относительности и квантовой теории в первой половине XX в., разработка единой теории электромагнитного и слабого взаимодействий в наши дни. Всё это так. Однако картина мира в результате отнюдь не становится проще, но, наоборот — приобретает новые черты, *усложняется*. *Процесс интеграции знания диалектически связан с развивающейся дифференциацией научных направлений.* Симметрия диалектически связана с асимметрией. И чем больше мы постигаем симметрию природы, тем шире проявляется асимметрия.

Говоря о диалектике симметрии и асимметрии в научном познании, хотелось бы указать, в частности, на то, что эта диалектика лежит в основе любой научной классификации. Ведь классификация в равной мере предполагает как сохранение (общность), так и изменение (различия) свойств классифицируемых объектов. Прекрасный пример — Периодическая система элементов Д. И. Менделеева. Она может служить хорошей иллюстрацией диалектики симметрии и асимметрии. Симметрия свойств соответствующих элементов из разных периодов сочетается с асимметрией свойств элементов внутри периода.

Диалектика симметрии и асимметрии играет важную роль не только в науке, но и в искусстве. «Мир беспорядочно усеян упорядоченными формами», — заметил французский поэт Поль Валери (1871 – 1945). Он же отмечал, что «события наиболее удивительные и наиболее асимметричные по отношению к ходу ближайших минут обретают некую закономерность в перспективе более обширных периодов». Принято отождествлять симметрию с красотой, с гармонией, с совершенством. Но разве могут считаться красивыми почти идеально симметричные дома-коробки и геометрически правильные районы из таких домов? Что красивее — аккуратно подстриженные газоны и деревья или цветущий дикий луг с буйным и совсем не симметричным рисунком красок? Наверное, не следует отождествлять симметрию с красотой и гармонией. Потому что красота и гармония определяются не просто симметрией, а *диалектическим сочетанием симметрии и асимметрии*. Красота памятника архитектуры — в искусном соотношении между симметрией и асимметрией (прекрасный пример — собор Василия Блаженного в Москве). Красота симфонии — в искусном сочетании повторов (симметрии) с вариациями (асимметрией). В любом творении великих художников можно найти удивительное соединение уравновешенности (симметрии) с нарушениями композиции (асимметрией).

В Ленинграде в Эрмитаже хранится картина гениального Леонардо да Винчи «Мадонна Литта». На картине фигуры мадонны и ребёнка вписаны в правильный треугольник, который вследствие своей симметрии ясно воспринимается зрителем. В результате мать с ребёнком оказываются в центре внимания, как бы выдвигаются на передний план. Симметрично расположенные окна, горизонтальные линии облаков и пологих холмов, гармоничное сочетание голубого с жёлтым и красным — всё это создает ощущение покоя и умиротворённости. Мадонна сосредоточена на младенце, она бережно держит его на руках, нежно глядит на него. Создается эффект внутренней замкнутости картины, отъединённости её от мира. Но вот вы встречаетесь с обращённым к вам спокойным и внимательным взглядом ребёнка — и замкнутость картины исчезает. Нарушается внутренняя уравновешенность композиции, картина раскрывается во внешний мир. Попробуйте мысленно убрать эту чудесную асимметрию, повернуть лицо младенца к матери, соединить их

взгляды. Разве вы не чувствуете, что от этого картина станет менее выразительной, менее глубокой — уменьшится её красота.

Этот удивительно симметричный мир, построенный на вероятности (связь между диалектикой симметрии и асимметрии и диалектикой необходимого и случайного). Выше мы уже отмечали эту связь; теперь поговорим о ней немного подробнее. Как известно, диалектическое единство необходимого и случайного выражается через *вероятность* (см. § 13). А между вероятностью и симметрией существует глубокая связь. Классическое определение вероятности основывается на подсчёте равновозможных исходов; в свою очередь, равновозможные исходы предполагают симметрию (например, симметрию кубика, благодаря которой равновероятно выпадение любой грани при подбрасывании кубика). Вероятность события определяется как величина, пропорциональная числу равновозможных (симметричных) исходов, в каждом из которых реализуется данное событие. Фундаментальное правило сложения вероятностей основано на симметрии, связанной с событиями, — ищется вероятность, что произойдёт либо одно событие, либо другое, причём безразлично, какое именно (результат не зависит от замены одного события другим, он симметричен по отношению к этой замене) Если существует ещё более глубокая симметрия, связанная с неразличимостью событий, то правило сложения вероятностей превращается в правило сложения амплитуд вероятностей (§ 8).

Связь между симметрией и вероятностью можно представить в ещё более конкретном виде, если обратиться к понятию *информации*. Подчеркнём, что теория информации является принципиально статистической; именно вероятностный подход даёт научное, объективное понятие информации, свободное от субъективных представлений, когда количество информации подменяется её ценностью и важностью. Связь между информацией и вероятностью наглядно демонстрирует *формула Шеннона* — одна из фундаментальных формул в теории вероятностей (см. [105, с. 221 – 251; 120, с. 88 – 94]). Что же касается связи между информацией и симметрией, она такова: *более симметричному состоянию соответствует меньшей информация*. Можно утверждать, что с повышением симметрии состояния возрастает его энтропия. Анализируя эти вопросы в работе «Симметрия и вероятность», В. П. Криндач отмечает: «Поскольку информация тем меньше, чем больше энтропия, а вероятность и энтропия вместе увеличиваются и вместе уменьшаются, постольку в свете нашего качественного правила «чем больше симметрия, тем меньше информация» следует ожидать такого правила для связи симметрии и вероятности: большей симметрии соответствует большая вероятность» [97, с. 260].

Как уже отмечалось, симметрия действует в направлении ограничения числа возможных вариантов структур, вариантов поведения систем. Необходимость действует в том же самом направлении. С другой стороны, асимметрия действует в направлении увеличения числа вариантов; в этом же направлении действует и случайность (мы уже обращали внимание на то, что случайности создают новые возможности, порождают новые альтернативы).

Сокращая число возможных вариантов, симметрия и необходимость вносят в мир порядок (это мы оцениваем положительно). В то же время симметрия и необходимость, сокращая число альтернатив, могут привести к безвыходной ситуации, завести в тупик, создать обречённость (это мы оцениваем, конечно, отрицательно). В подобных «тупиковых» ситуациях жизненно важна спасительная случайность, способная разрушить симметрию, создать неожиданный выход из тупика. В данном случае физики употребляют термин «спонтанное нарушение симметрии».

Создавая новые возможности, новые альтернативы, асимметрия и случайность обеспечивают развитие, способствуют творческому поиску, появлению новой информации (это мы оцениваем положительно). В то же время асимметрия и случайность вносят дезорганизацию, увеличивают степень беспорядка в нашем мире (это мы оцениваем отрицательно). Обилие альтернатив, разнообразных вариантов может стать чрезмерным — и тогда на помощь приходит упорядочивание в лице симметрии и необходимости.

Так и живём, находясь под воздействием, с одной стороны, симметрии и необходимости, а с другой — асимметрии и случайности и используя в своей практике (сознательно или стихийно) эту диалектику — диалектику симметрии-асимметрии, диалектику необходимого и случайного.

Опасность со стороны случайностей вполне понятна, её все хорошо осознают. Но не все понимают, как может оказаться опасной симметрия. Однако строители современных мостов, высотных зданий, башен знают, что конструкция не должна быть безупречно симметричной из-за опасности возникновения резонансных колебаний, которые могут привести к её разрушению. Поэтому симметрию конструкции сознательно нарушают, вводя в неё отдельные асимметричные элементы.

Отметим *неустойчивость симметрии*; именно она делает возможным спонтанное нарушение симметрии. Исследования этой неустойчивости привели к рождению нового научного направления — *теории катастроф* (см. [8]). Частица вызывает бурный процесс в счётчике Гейгера — Мюллера; это катастрофа в масштабе микромира. Огромный мост внезапно разваливается из-за резонансных колебаний; это катастрофа в привычном для нас масштабе. Примеры катастроф могут быть крайне разнообразными: внезапная кристаллизация переохлаждённой жидкости в сосуде, рождение горного обвала, возникновение генерации в лазере, возникновение жизни на Земле. Об этой глобальной, благоприятной для нас катастрофе упоминалось в § 14. Во всех подобных случаях система характеризуется неустойчивой симметрией, которая разрушается под действием случайных факторов. Случайности способны развязать в такой системе бурно протекающие процессы, которые рассматриваются как своего рода катастрофы.

§ 16. ПРИНЦИП СООТВЕТСТВИЯ И ДИАЛЕКТИКА ПРОЦЕССА ПОЗНАНИЯ

Принцип соответствия в квантовой механике. Предложенная М. Планком в 1900 г. знаменитая формула для плотности энергии теплового излучения переходит в классическую формулу Рэлея — Джинса, если $h\nu \ll kT$ (h — постоянная Планка, квант действия; k — постоянная Больцмана; ν — частота излучения; T — абсолютная температура). Это натолкнуло Планка на мысль, что классическую теорию можно рассматривать как теорию, в которой бесконечно мал квант действия, или, точнее, как теорию, в которой постоянной h можно пренебречь. Таким образом, уже в самом начале века был поставлен вопрос о взаимосвязи новой (квантовой) теории с классической.

Затем этим вопросом занялся Н. Бор. «Мы должны допустить, — отмечал Бор, — что механизм излучения (речь идёт об излучений света атомами. — *Авт.*) не может быть в деталях описан методами обычной электродинамики. Однако известно, что последняя даёт удовлетворительное объяснение явлений излучения в области малых частот. Если наша точка зрения справедлива, то следует ожидать наличия в данной области определённого *соответствия* (курсив наш.— *Авт.*) между излагаемой теорией и точкой зрения обычной электродинамики» [11, с. 172]. Говоря об «области малых частот», Бор имел в виду излучение, которое рождается на переходах между уровнями, характеризующимися большими квантовыми числами (напомним рис. 2.8). Через несколько лет он ввёл специальный термин — «принцип соответствия». Боровский принцип соответствия можно сформулировать так: «Для больших квантовых чисел излучение, испускаемое атомом при переходе из одного состояния в другое, асимптотически совпадает с одной из частот, ожидаемых по классической теории» [98, с. 9].

Используя этот принцип, можно получить условие квантования момента импульса электрона на орбите, определяющее в теории Бора радиус орбит, отвечающих стационарным состояниям. Соответствующие выкладки довольно просты. Прежде всего представим

энергию E_n электрона на n-й орбите как $E_n = T_n + U_n$, где $T_n = \frac{mv_n^2}{2}$ — кинетическая энергия, а $U_n = -\frac{e^2}{r_n}$ — потенциальная энергия (r_n и v_n — соответственно радиус n-й орбиты и скорость электрона на этой орбите), Учитывая, что $\frac{mv_n^2}{r_n} = \frac{e^2}{r_n^2}$ (кулоновское притяжение сообщает электрону центростремительное ускорение), получаем $T_n = -\frac{U_n}{2}$ и, следовательно, $E_n = T_n - 2T_n = -\frac{mv_n^2}{2}$. Подставляя этот результат в правило частот Бора (см. § 7) для перехода между $(n+1)$-м и n-м уровнями (орбитами), запишем

$$\nu = \frac{m}{2h}(v_n^2 - v_{n+1}^2) = \frac{mv_n}{2h}(v_n + v_{n+1})\left(1 - \frac{v_{n+1}}{v_n}\right) \quad (1)$$

Пусть $n \gg 1$. В этом случае можно принять $v_n + v_{n+1} = 2v_n$, после чего выражение (1) упрощается:

$$\nu = \frac{mv_n^2}{h}\left(1 - \frac{v_{n+1}}{v_n}\right) \quad (2)$$

Согласно боровскому принципу соответствия, в данном случае частота перехода ν должна совпадать с классической частотой обращения электрона по орбите $\nu' = \frac{v_n}{2\pi r_n}$:

$$\frac{mv_n^2}{h}\left(1 - \frac{v_{n+1}}{v_n}\right) = \frac{v_n}{2\pi r_n}.$$

Отсюда

$$mv_n r_n\left(1 - \frac{v_{n+1}}{v_n}\right) = \frac{h}{2\pi}. \quad (3)$$

Из данных спектроскопии следует $E_n \sim 1/n^2$ и, значит, $v_n \sim 1/n$, так что $1 - \frac{v_{n+1}}{v_n} = 1 - \frac{n}{n+1} = \frac{1}{n+1}$. При $n \gg 1$ можно принять $\frac{1}{n+1} = \frac{1}{n}$, после чего соотношение (3) превращается в условие квантования момента импульса: $mv_n r_n = \frac{nh}{2\pi}$. Из этого условия видно, что при $n \gg 1$ должно выполняться неравенство $h \ll 2\pi m v_n r_n$ и, значит, квантом действия можно пренебречь. Таким образом, боровский принцип соответствия включает в себя выдвинутое ещё раньше Планком условие относительной малости кванта действия.

Родившись на заре квантовой физики, принцип соответствия сыграл исключительно важную роль в её становлении и развитии. Одновременно происходило *углубление содержания самого принципа*, формировалось понимание того, что квантовая механика «содержит классическую как свой предельный случай и в то же время нуждается в этом предельном случае для самого своего обоснования» [61, с. 16].

Разрабатывая в 1925 г. свою матричную механику, В. Гейзенберг широко использовал принцип соответствия. Он подчёркивал: «Для вывода математической схемы квантовой теории... мы имеем в распоряжении два источника: эмпирические факты и принцип соот-

ветствия. Боровский принцип соответствия в своей наиболее общей формулировке гласит, что между квантовой теорией и соответствующей данной применённой картине классической теорией существует качественная аналогия, которая может быть проведена до деталей» [30, с. 80]. Э. Шрёдингер пришёл к своему знаменитому уравнению, пытаясь найти такое обобщение классической механики, которое было бы аналогично переходу от геометрической оптики к волновой. Рассматривая интегралы по траекториям, Р. Фейнман особенно наглядно продемонстрировал предельный переход от квантовой механики к классической (см. § 12); этот переход, напоминаем, предполагает выполнение неравенства $h \ll S$ (здесь S — действие).

«Чрезвычайно важно для понимания квантовой механики и роли принципа соответствия следующее обстоятельство. Если при создании элементарной квантовой теории Бора принцип соответствия играл роль «лесов», необходимых при возведении здания теории, и эти «леса» в дальнейшем могли быть убраны, то в строгой квантовомеханической теории обращение к классической механике Ньютона остаётся неизбежным элементом теории. Это проявляется, в частности, в том, что написать основное уравнение теории — уравнение Шрёдингера — для каждой конкретной задачи можно, лишь взяв из классической механики выражение потенциальной энергии для этой задачи: $-e^2/r$ — для атома водорода, $kx^2/2$ — для осциллятора и т. д. Иначе говоря, принцип соответствия является в квантовой механике неотъемлемой составной частью теории» [98, с. 149]. Авторы этих строк советские физики Ю. Б. Румер и М. Ш. Рывкин подчёркивают здесь принципиальное обстоятельство: в аппарате квантовой механики физическим величинам ставятся в соответствие операторы (существуют операторы координаты, импульса, момента импульса, энергии и т. д.), которые с точностью до соотношений коммутации взаимосвязаны такими же соотношениями, какими связаны друг с другом в классической механике сами физические величины. Поистине квантовая механика нуждается в своём предельном случае (классической механике) для собственного обоснования.

Развитие физики и принцип соответствия. Являясь важным методологическим принципом, принцип соответствия, конечно, не ограничен рамками квантовой механики. С точки зрения этого принципа надо рассматривать весь процесс развития физики (и не только физики, но и всего естествознания). Теория относительности возникла как ещё одно обобщение классической механики; последнюю можно рассматривать как частный случай релятивистской механики. Волновая оптика представляет собой обобщение геометрической; последняя есть частный случай волновой оптики. В свою очередь, волновая оптика является частным случаем квантовой оптики. Современная статистическая физика фермионных коллективов (статистика Ферми — Дирака) и бозонных коллективов (статистика Бозе — Эйнштейна) есть обобщение классической статистической физики (статистики Максвелла — Больцмана). Перечень подобных примеров мог бы быть довольно обширным.

Во всём этом проявляется общая закономерность, характеризующая процесс развития физики. «Эту закономерность исторического развития физической науки в целом можно сформулировать как принцип соответствия в его наиболее общей форме: теории, справедливость которых экспериментально установлена для той или иной области физических явлений, с появлением новых, более общих теорий не устраняются как нечто ложное, но сохраняют своё значение для прежней области явлений как предельная форма и частный случай новых теорий... Принцип соответствия является одним из важнейших достижений теоретической физики и всего физико-математического естествознания XX в. Благодаря ему история физической науки предстаёт перед нами не как хаотическая смена различных более или менее удачных теоретических воззрений, не как череда их катастрофических крушений, а как закономерный и последовательный процесс развития познания, идущего ко всё более широким обобщениям, как познавательный прогресс, каждая ступень которого имеет объективную ценность и доставляет частицу абсолютной истины, обладание которой становится всё более и более полным» [98, с. 50 – 51]. Родившись в лоне квантовой

механики как некий эвристический принцип, принцип соответствия превратился в общий *методологический* принцип, определяющий общую закономерность развития естественных наук.

Проблема истины с точки зрения метафизики, физического релятивизма и материалистической диалектики. Проблема истины — одна из главных среди проблем, с которыми мы сталкиваемся, исследуя процесс познания. В известном смысле познание — это постижение истины.

С позиций *метафизики* человеческий разум либо сразу и полностью постигает истину, либо абсолютно заблуждается — третьего не дано (напомним диалог «О диалектике и метафизике»). Либо абсолютно верное знание, либо абсолютное заблуждение. История развития науки вообще и физики в частности насыщена примерами метафизического абсолютизирования достигнутых успехов и, как следствие, наивных (с нашей точки зрения) выводов о близящемся окончательном завершении процесса научного познания.

В своё время возводилось в абсолют механическое объяснение природы (см. § 3), затем столь же абсолютно воспринималась электромагнитная картина мира (см. § 4). В первой половине XVII в. Р. Декарт объявил, что с помощью геометрических рассуждений он объяснил все явления природы. На рубеже XVIII – XIX вв. Р. Гаюи (1743 – 1822) писал: «Изучение электричества, обогащённое трудами стольких знаменитых физиков, дошло, казалось, до такого предела, когда не может быть заметного движения вперёд, а будущим работникам в этой области остаётся лишь надежда подтверждать открытия предшественников и освещать уже добытые истины» [98, с. 56]. А вот воспоминания, относящиеся к рубежу XIX – XX вв. М. Планк вспоминает: «Когда я начал свои физические занятия и спросил у своего почтенного учителя Филиппа Жолли совета об условиях и перспективах моих занятий, он представил мне физику, как высоко развитую, почти вполне созревшую науку, которая должна скоро принять свою окончательную устойчивую форму после того, как она в известном смысле увенчана открытием принципа сохранения энергии. Конечно, в том или ином уголке можно ещё заметить или удалить пылинку или пузырёк, но система, как целое, стоит довольно прочно, и теоретическая физика заметно приближается к той степени совершенства, какою уже столетия обладает геометрия» [95, с. 15 или 98, с. 56].

Впрочем, подобные иллюзии всякий раз обнаруживали свою несостоятельность. Это должен был признать Гаюи — он закончил приведённую выше мысль словами: «И вот, когда наука, казалось, приближается к состоянию покоя, явление конвульсивных движений, подмеченных Гальвани в мускулах лягушки при соприкосновении их с металлами, привлекло к себе внимание и изумление физиков» [98, с. 56 – 57]. Что же касается уверенности физиков конца прошлого столетия в скором завершении физической науки, то, как мы знаем, она потерпела полный крах — вместо окончательного триумфа науки действительность преподнесла кризис физики, завершившийся «новейшей революцией в естествознании» (см. § 5).

С точки зрения философии метафизический подход к процессу познания означает отождествление абсолютной и относительной истин. Метафизик воспринимает каждую очередную теорию как окончательную, он рассматривает её как абсолютную истину. Поэтому появление новой теории может восприниматься им как крушение старых принципов. Рано или поздно это приводит к противопоставлению абсолютного относительному. Делается вывод, что абсолютная истина вообще не существует, что познание сугубо относительно, субъективно, условно. Такова позиция *физического релятивизма*. Она органически связана с *агностицизмом* — признанием принципиальной непознаваемости сущности вещей и явлений. Напомним в связи с этим упаднические настроения, охватившие широкие круги философов и физиков в самом начале нашего столетия. «Теоретическая физика, как мы её понимаем, — писал в 1910 г. П. Дюгем, — не в состоянии рассмотреть позади явлений, доступных нашему восприятию, действительные свойства тел... Теоретическая физика не постигает реальности вещей, она ограничивается только описанием дос-

тупных восприятий явлений при помощи знаков или символов» [98, с. 66]. «В итоге, — заключал А. Пуанкаре, — единственной объективной реальностью являются отношения вещей» (эту замену вещей отношениями мы отмечали в § 5).

Совершенно иначе подходит к познанию, к проблеме истины *диалектический материализм*. Процесс познания есть процесс, в котором из незнания постепенно рождается знание; в этом процессе неполное, неточное знание постепенно становится более полным, более точным. Процесс познания — это процесс движения к абсолютной истине через бесконечную последовательность относительных истин. В. И. Ленин выделял следующие принципиальные моменты: «из суммы относительных истин в их развитии складывается абсолютная истина», «относительные истины представляют из себя относительно верные отражения независимого от человечества объекта», «эти отражения становятся всё более верными», «в каждой научной истине, несмотря на её относительность, есть элемент абсолютной истины» [4, с. 328].

Процесс движения к абсолютной истине происходит не плавно, не путём простого накопления фактов, а диалектически — через революционные скачки; при этом всякий раз преодолевается противоречие между накопившимися фактами и господствующей в данное время парадигмой (см. диалог «О научных революциях»). Каждый очередной этап в развитии научного знания диалектический материализм не абсолютизирует, а рассматривает как этап, отвечающий определённому уровню относительного знания, содержащему какие-то элементы абсолютной истины. В процессе смены этапов происходит постепенный переход на уровни более глубокого относительного знания, происходит постепенное приближение к абсолютной истине. Существенно, что процесс этого приближения бесконечен — процесс познания человеком окружающего мира никогда не завершится (об этом мы говорили в диалоге «О путях дальнейшего развития физики», а также в § 15). «Истина теперь заключалась, — писал Ф. Энгельс, — в самом процессе познания, в длительном историческом развитии науки, поднимающейся с низших ступеней знания на всё более высокие, но никогда не достигающей такой точки, от которой она, найдя некоторую так называемую абсолютную истину, уже не могла бы пойти дальше и где ей не оставалось бы ничего больше, как, сложа руки, с изумлением созерцать эту добытую абсолютную истину. И так обстоит дело не только в философском, но и во всяком другом познании, а равно и в области практического действия» [3, с. 275].

Философское значение принципа соответствия. Философское значение принципа соответствия в том, что он показывает, *как именно* в физике (и вообще в естествознании) реализуется тезис диалектического материализма о том, что абсолютная истина складывается из бесконечной последовательности относительных истин. Принцип соответствия утверждает, во-первых, что каждая физическая теория — *относительная* истина, содержащая элемент абсолютной истины; она занимает определённое место в развивающейся науке, соответствует определённому этапу в процессе познания. Во-вторых, принцип соответствия утверждает, что смена физических теорий — это не череда катастроф, а естественный процесс *развития* физики, движение разума через последовательность относительных истин к абсолютной, постепенно углубляющееся проникновение в сущность вещей и явлений. Наконец, в-третьих, принцип соответствия утверждает, что, сколь бы «безумными» ни казались новые теории, как бы антагонистически они ни выглядели по отношению к прежним теориям, они всё равно образуют *единое целое*. С одной стороны, *новая теория является обобщением прежней* и включает в себя последнюю как частный случай. С другой стороны, старая теория всегда в известном смысле «подпирает» новую теорию, вносит вклад в *обоснование* последней. Философскую интерпретацию принципа соответствия следует рассматривать как действительно наиболее общую формулировку этого принципа.

Таким образом, развитие физики — это не механическая замена старых теорий новыми, старых взглядов новыми, старых подходов новыми, равно как и не механическое накопление новых фактов, новых понятий, новых законов. *Развитие физики — это процесс*

последовательного обобщения, когда новое отрицает старое, но не просто отрицает, а с удержанием всего того положительного, что было накоплено в старом.

С учётом сказанного можно сделать некоторые принципиальные замечания по поводу того, каким должен быть действительно современный школьный курс физики. Ясно, что он не должен ориентироваться только на современные физические теории. Ясно также, что он не должен уподобляться накопителю фактов и представлять собой некий старый курс, дополненный новыми сведениями. Современный школьный курс физики должен строиться *на основе принципа соответствия* — когда современное знание выступает как обобщение прежнего знания, когда старое рассматривается с позиции нового, а новое преподносится как дальнейшее углубление старого.

Современную физику обычно вводят в среднюю школу как некую важную и всегда немного таинственную гостью, снисходительно поглядывающую на окружающих. В сущности, ей нет дела до классической физики, равно как классической физике нет дела до неё. Она скупо отмеряет школьникам от своих богатств в виде отдельных параграфов, помеченных указаниями «для ознакомительного изучения» или «для дополнительного чтения». Вряд ли можно называть современным подобный школьный курс физики.

Современная физика должна появиться в средней школе не как важная гостья, а как умная хозяйка, способная подчинить себе весь курс, найти в нём должное место всем рассматриваемым вопросам. Ей совсем не обязательно раскрывать все свои тайны, демонстрировать все свои высоты. Важно, чтобы она создала конструкцию, в которой классическая физика выступала бы в диалектическом единстве с современной, где прежние законы осмысливались бы с позиций современной науки, где всё рассматривалось бы с точки зрения методологии современной науки — на основе диалектики необходимого и случайного, диалектики симметрии и асимметрии, диалектики процесса познания.

Поэтому вызывает особые опасения наметившийся в последнее время процесс упрощения школьного курса физики по мотивам его перегруженности и недоступности многим учащимся. Следует не разгружать курс физики, а радикально его перестраивать. И главное в этой перестройке — обращение к идеям, методологии современной физики. Именно на этом пути возможно создание действительно развивающего курса, который был бы полезен и доступен всей массе учащихся.

Заключительный диалог. Каким представляется современный школьный курс физики



Учитель. Вы хорошо заметили, что современная физика должна прийти в среднюю школу не в качестве важной гостьи, а в качестве умной и заботливой хозяйки, которая задала бы нужный тон всему процессу преподавания физики. Но как именно это можно было бы осуществить на практике?

Автор. Фактически мы вели об этом разговор на протяжении всей книги.

Учитель. Наверное, надо как-то подытожить этот разговор.

Автор. Конечно. Подводя итоги, обсудим сначала, каким должен быть действительно современный школьный курс физики, как он должен быть ориентирован, какие задачи должен решать, а затем коснёмся и сугубо практических вопросов о том, как всё это можно реализовать или, во всяком случае, с чего следует начинать.

Учитель. Именно об этом и хотелось бы поговорить «под занавес».

Автор. Прежде всего напомним, что проблема модернизации курса физики в средней школе довольно широко обсуждается в нашей методической литературе последних лет (см., например, [14, 22, 35, 38, 47, 51, 62, 70, 78, 79, 80, 91, 102, 108, 111, 112, 114, 127, 128, 146]). Попробуем теперь сформулировать основные требования к школьному курсу физики, каким он, на наш взгляд, должен удовлетворять, чтобы действительно стать современным. Все эти требования связаны, в конечном счёте, с принципом соответствия.

Во-первых, курс физики должен не только служить источником фундаментальных знаний о законах природы и практических знаний об использовании этих законов для целей научно-технического прогресса, но и вносить существенный вклад в развитие школьника, воспитывать его, формировать у него диалектическое мышление, учить ориентироваться в шкале культурных ценностей.

Во-вторых, курс физики должен не просто отражать в популярной форме отдельные достижения современной науки, но должен целиком строиться на основе методологических принципов этой науки. Его надо буквально пронизать как диалектикой необходимого и случайного, так и диалектикой симметрии и асимметрии. Весь фактический материал, включая и законы классической физики, необходимо оценивать и обсуждать с позиций материалистической диалектики.

В-третьих, курс физики должен быть открыт на остальные учебные предметы — не только на математику и информатику, но и на химию, биологию, географию, а также в известной мере на гуманитарные предметы. Вместо обособления, сосредоточения на сугубо физических проблемах — межпредметное взаимодействие, выход за рамки собственно физики (см., например, [49]).

В-четвёртых, курс физики должен быть ориентирован не только на научно-технические вопросы, но на всю нашу действительность во всём её многообразии, на жизненно важные проблемы, среди которых на первом месте стоят проблемы перестройки экономики и самого мышления с позиций экологического императива.

Учитель. Со всем этим нельзя не согласиться. Подобные соображения выдвигались и раньше. К сожалению, они неизменно оставались лишь благими пожеланиями.

Автор. Я понимаю Ваши сомнения. Тем не менее в нынешних условиях решительной перестройки народного образования в стране очень важно предпринять новую попытку коренным образом модернизировать преподавание физики в школе. Перечисленные выше четыре требования означают, что школьный курс физики должен быть перестроен в направлениях, во-первых, *гуманитаризации*, во-вторых, *обеспечения современного методологического уровня,* в-третьих *интеграции*, в-четвёртых, *решительного приближения к жизни*. Эти идеи были апробированы на многочисленных встречах и дискуссиях с учителями школ, преподавателями и студентами педвузов, работниками аппарата управления народным образованием. Я попытался изложить их в ряде статей [43, 103, 125, 126].

Учитель. Вы употребили термины «гуманитаризация» и «интеграция». В последние годы эти слова произносятся всё чаще; при этом нередко наблюдается разное их толкование. Хотелось бы знать, что именно вкладываете Вы в упомянутые термины, когда говорите о перестройке преподавания физики в школе.

Автор. Начнём с *гуманитаризации*. О необходимости гуманитаризации народного образования настойчиво говорят в последнее время, понимая под ней поворот школы к проблемам развития личности, воспитания гражданских качеств, развития мышления, приобщения к культурным ценностям. В связи с этим появляются предложения увеличить в учебных планах относительный объём предметов общественно-гуманитарного цикла. Такой сугубо экстенсивный подход нельзя признать оптимальным.

Учитель. Он напоминает знаменитый тришкин кафтан.

Автор. Совершенно верно. Проблема гуманитаризации народного образования должна решаться не перераспределением часов между естественными и гуманитарными предметами в пользу последних, а за счёт *усиления гуманитарной направленности всех учебных предметов и прежде всего физики*. Для этого надо перестроить преподавание школьной физики таким образом, чтобы выявить и активно использовать её огромный *гуманитарный потенциал*.

Учитель. Что именно понимается под гуманитарным потенциалом физики?

Автор. Во-первых, *нравственное начало*, которое связывают с понятиями «правда фактов», «правда суждений». Физика имеет дело с истинами, не зависящими от моды, традиций, авторитетов, конъюнктуры. Здесь, как говорится, чего нет — того нельзя считать. Вспомним: Платон мне друг, но истина дороже. Во-вторых, *мировоззренческое начало*, связанное с пониманием того, как устроен и как развивается мир, каково место человека в нём. В не меньшей степени, чем литература или история, физика увлечена гогеновскими вопросами: кто мы? Откуда мы? Куда мы идём? Именно физика исследует «первоначала вещей» и «первопричины явлений», именно она рассматривает принципиальные вопросы о роли исследователя, сущности измерительного акта, методах познания мира. В-третьих, *эстетическое начало*, связанное с пониманием красоты мира через его единство и гармонию и, как следствие, обострением чувства прекрасного (см. [70]). В-четвёртых, *гражданское начало*, связанное с воспитанием чувства личной сопричастности всему происходящему в мире, личной ответственности за будущее этого мира. Понимание законов природы — необходимое условие пробуждения желания считаться с этими законами, учитывать их в практической деятельности. Не зная законов природы, трудно предвидеть возможные последствия антропогенной нагрузки на природу. В-пятых, *атеистическое начало*, связанное с пониманием того, что мир развивается по объективным законам, что в нём нет места «потусторонним явлениям». Легко видеть, сколь огромны потенциальные возможности физики в деле воспитания учащихся. Но гуманитарное содержание физики

этим не исчерпывается. Она самым существенным образом *воздействует на мышление человека,* активно способствует формированию системы основных концепций общества на данном этапе. Ещё и ещё раз подчеркнём: *современная физика преподала человечеству убедительнейший урок материалистической диалектики* (см. § 1, а также всю третью главу). Она продемонстрировала ряд диалектических истин, представляющих серьёзный вклад в само мышление, выходящих по своей значимости за рамки собственно физики: фундаментальность вероятностных причинных связей, всеобщность принципа симметрии, важность принципа соответствия, стирание граней, перегородок по мере перехода к атомному уровню организации материи. Разумно используя всё это в процессе преподавания физики в школе, мы могли бы *на уроках физики учить школьников диалектике*. К сожалению, пока мы этого не делаем.

Учитель. Чем объяснить, что столь ценный и вполне очевидный гуманитарный потенциал физики до сих пор фактически игнорировался в средней школе?

Автор. Полагаю, причин тому несколько. Диктуемое жизнью требование ускорения научно-технического прогресса неизбежно приводило к ориентации школьной физики прежде всего на технические проблемы. Эта ориентация естественна, но, к сожалению, произошло метафизическое абсолютизирование такой ориентации; «прежде всего» превратилось в «только». Нынешний школьный курс физики ориентирован только на технический прогресс. Физика «заболела» технократизмом — одной из опаснейших социальных болезней нашего века. В этом одна из причин забвения гуманитарного потенциала физики (как, впрочем, и всех естественных наук). Другая причина — метафизическая разобщённость школьных предметов, убеждение в том, что предметы можно чётко разделять на «гуманитарные» и «негуманитарные». Все согласны, что без знания литературы и истории невозможен культурный человек (и это, конечно, совершенно верно); однако многие полагают, что культурный человек вполне возможен без знания физики и математики (а это большое заблуждение). Наконец, распространено ошибочное мнение, что физика изучает специальные вопросы, понятные только сравнительно небольшому кругу людей. «Существует тенденция забывать, — писал Э. Шрёдингер, — что все естественные науки связаны с общечеловеческой культурой и что научные открытия, даже кажущиеся в настоящий момент наиболее передовыми и доступными пониманию немногих избранных, всё же бессмысленны вне своего культурного контекста» [142, с. 261].

Учитель. Чувствую, что мы выходим на идею интеграции.

Автор. *Идеи гуманитаризации и интеграции органически связаны.* Невозможно измерить весь вред, какой принесла (и приносит) обществу, его культуре разобщённость школьных предметов, имеющая логическое продолжение в узости тематики методических разработок, в несогласованности научных исследований и, в конечном счёте, в межведомственных перегородках.

Учитель. Насколько я знаю, интеграция уже проникает в школу. Физику пробуют объединить с астрономией в рамках одного предмета. В некоторых экспериментальных учебных планах предусматриваются интегративные предметы «Естествознание» или «Окружающий мир». В диалоге «О формировании у школьников вероятностного мышления» Вы рассказывали об интегративном предмете «Закономерности окружающего мира».

Автор. Это так. Но, говоря об интеграции как о некоем общем принципе, я не хотел бы сводить всё к отдельным объединениям тех или иных предметов или к созданию интегративных предметов. Здесь важно подчеркнуть *существенное развитие идеи межпредметных связей* — переход от согласования преподавания физики и смежных предметов к *диалектическому взаимодействию* предмета «Физика» с другими учебными предметами, причём не только естественного, но и гуманитарного цикла.

Учитель. Без согласования предметов учебный процесс был бы практически невозможен. Физика использует математические понятия функции и вектора; химия и биология используют понятия и закономерности, рассматриваемые в физике.

Автор. К сожалению, дальше этого интеграция пока не идёт. Важно перейти на более

глубокий уровень интеграции: широко использовать на уроках физики понятия, образы, представления, рассматриваемые в других предметах, учить школьников многомерному видению явлений.

Учитель. Вы имеете в виду экскурсы в химию, биологию, географию на уроках по физике?

Автор. И даже в литературу и историю. Это, во-первых, обеспечит более глубокое понимание и, значит, повысит усвояемость физического материала, а во-вторых, будет способствовать формированию у учащихся целостной системы знаний.

Ещё более глубокий уровень интеграции предполагает использование на уроках по разным предметам *общих принципов*, составляющих методологическую основу современной физики (эти принципы должны проходить через разные предметы «красной нитью»), и рассмотрение *комплексных проблем*, которые по самой своей сути требуют привлечения знаний из разных предметов.

Учитель. Общие принципы — это, по-видимому, прежде всего фундаментальность вероятностных закономерностей и принцип симметрии?

Автор. Конечно. Мы об этом уже говорили. Поэтому остановимся только на комплексных проблемах. Конечно, такие проблемы не могут считаться «собственностью» только физики (или какого-либо другого предмета). Однако именно учитель физики, именно курс физики в школе должны, как мне кажется, взять на себя организующую функцию «дирижёра» при рассмотрении подобных проблем. Приведу в качестве примера две комплексные проблемы.

Первый пример — *проблема солнечно-земных связей*. До последнего времени как-то не обращалось внимания на то, что Земля находится фактически в пределах солнечной короны, что Солнце — не только источник жизни на Земле, но и постоянная угроза этой жизни. Солнечный ветер (потоки электронов и протонов, летящие от Солнца) и электромагнитное солнечное излучение непрестанно облучают Землю, грозя уничтожить на ней всё живое. От солнечного ветра нас защищает магнитное поле Земли, а от электромагнитного излучения — атмосфера, и, в частности, относительно тонкий слой озона. Возмущения на Солнце приводят к возмущениям геомагнитного поля, зарождению в земной атмосфере мощных циклонов, магнитосферным бурям и, как следствие, к ухудшению самочувствия людей. Весь этот комплекс вопросов имеет прямое отношение не только к физике, но и к астрономии, химии, биологии, географии. Сегодня он приобретает также социальное звучание.

Второй пример — *экологические проблемы*. Сегодня они должны рассматриваться не с традиционной точки зрения природоохранительных мероприятий, а с гораздо более широкой точки зрения — на основе сделанного академиком В. И. Вернадским прогноза развития взаимоотношений человека и окружающей среды. Человек давно оказывает заметное влияние на ход эволюционных процессов на Земле. Но сейчас антропогенная нагрузка на природу возросла настолько, что фактически приблизилась к критической черте, когда возможен необратимый непредсказуемый переход всей биосферы в качественно новое состояние (скорее всего непригодное для обитания людей). В такой критической ситуации необходимо комплексное исследование географической оболочки Земли, согласованное с исследованием общественных процессов (см. [74]). Сегодня экологические проблемы, вдруг и как бы даже неожиданно для нас обострившись, ставят вопрос, никогда ранее не поднимавшийся, — вопрос об этике взаимоотношений человека и природы, вопрос о нравственном аспекте естественных наук. На наших глазах этот вопрос перерастает в проблему корреляции межгосударственных отношений с учётом последствий воздействия человечества на природу, на земную биосферу.

Мы уже говорили в § 11 (см. раздел «Смена естественнонаучной традиции»), что прежний подход к исследованию мира, когда человек выступал в роли стороннего наблюдателя, анализирующего окружающий его мир по частям, подход, восходящий к ньютоновской физике, теперь сменяется подходом, когда человек исследует мир как бы изнутри

и в едином комплексе. Человек включается теперь в исследуемый мир в качестве важнейшего фактора, определяющего дальнейшую эволюцию этого мира. Идеи интеграции и гуманитаризации фактически сливаются воедино, приобретая глобальный характер.

Учитель. Как я понимаю, речь идёт о трёх уровнях интеграции преподавания физики в школе. Первый уровень — согласование преподавания физики с преподаванием математики, химии, биологии, географии. Он отражён в существующих учебных планах и программах. Второй уровень — экскурсы на уроках по физике в другие предметы, широкое использование общих принципов. Этот уровень в существующих программах не отражён, но он не вступает в противоречие с учебными планами и может быть безболезненно реализован по инициативе учителя.

Автор. Замечу, что проведение в жизнь идеи фундаментальности вероятностных закономерностей вряд ли возможно без корректировки учебного плана.

Учитель. Согласен. Однако наибольших изменений в учебных планах и программах потребует реализация третьего уровня интеграции, связанного с рассмотрением комплексных проблем.

Автор. Фактически мы уже перешли с Вами к *практическим* вопросам построения нового школьного курса физики.

Учитель. Это самые важные вопросы.

Автор. Они, конечно, важны. Но не хотелось бы считать их самыми важными. Прежде всего надо понять, в каких направлениях должен перестраиваться курс физики, надо проникнуться идеями, которые будут определять эту перестройку.

Учитель. С идеями вроде бы всё ясно. Предположим, что мне, учителю физики, эти идеи импонируют. Как и Вы, я считаю, что нынешний школьный курс физики соответствует прошлому веку, и хочу его модернизировать. Что конкретно я должен делать?

Автор. Наверное, Вам следует постараться в процессе преподавания физики везде, где это возможно, демонстрировать и разъяснять упомянутые идеи. Перечитайте ещё раз все наши предыдущие диалоги — все они нацелены на вопросы практического преподавания физики и содержат немало конкретных примеров и советов.

Учитель. Разумеется, я это сделаю. И всё же есть масса вопросов практического характера. Хотелось бы знать Ваше мнение о том, надо или не надо изменять традиционную структуру предмета «Физика». С давних времён он строится по четырёхзвенному принципу: механика, тепловые явления и вещество, электродинамика, оптика. Новая программа по физике лишь немного изменила данную структуру, введя основную часть оптики в электродинамику и выделив в качестве заключительного, четвёртого «звена» квантовую физику. Предполагаете ли Вы сохранить структуру?

Автор. Конечно, новая программа по физике заметно совершеннее (современнее) прежней. К сожалению, сделанных изменений в программе недостаточно. С учётом высказанных ранее идей, я бы более существенно изменил программу. Я бы внёс три изменения. Во-первых, *в программу надо ввести вероятность, вероятностные закономерности* и именно с этих позиций рассмотреть разделы «Молекулярная физика», «Квантовая физика», а также «Электрический ток в средах». Впрочем, введение в программу вероятностей потребует полного её пересмотра; возможно, изменится вся структура курса физики. Во-вторых, введя вероятность в физику в школе, следовало бы взять за основу правило — *сначала* изучаются феноменологические, динамические теории (разделы), где вероятность может не использоваться, а *затем* изучаются статистические теории (разделы). В-третьих, рассматривая на первом этапе динамические теории, не следует начинать с механики; лучше начинать изучение физики с *оптики*.

Учитель. Лично мне Ваша идея начинать с оптики нравится. Но ведь именно механика позволяет познакомить учащихся с основными физическими понятиями — скоростью, ускорением, массой, силой, энергией.

Автор. А разве обязательно начинать изучение физики с усвоения перечисленных понятий? Это довольно скучно, отбивает у школьников интерес к предмету, а главное, в

этом нет особой необходимости. Пора отказаться от попыток построить курс физики на основе формальной логики, когда, прежде чем сказать «Б», надо непременно сказать «А». Убеждён, что в физику надо входить иначе. Не от формальной логики, не от отвлечённых понятий, не от казённых определений, а от природы, от наблюдений, от ассоциаций. Здесь нужна не логическая стройность, а удивление. А это лучше всего позволяет сделать именно оптика. Кроме того, начинать с оптики совершенно естественно — ведь основной объём информации об окружающем мире человек получает по оптическому каналу. К тому же следует всегда помнить, что именно в оптике «первопричины явлений» наиболее явно «выходят на поверхность». Недаром как теория относительности, так и квантовая физика начинались с оптических опытов (см. § 6 и 7).

Учитель. Но как изменить программы?

Автор. Раньше это было почти невозможно. Сегодня нам разрешено экспериментировать. И не только разрешено — сегодня экспериментирование, творческий поиск приветствуются, им даётся «зелёная улица». Так что мой совет — решайтесь на эксперимент.

Учитель. В эксперимент могут включиться лишь некоторые школы. А что делать учителям в остальных школах?

Автор. Везде в процессе преподавания надо стараться реализовать те идеи, которые мы с Вами обсуждали. Тогда даже самые «стандартные» разделы программы приобретут цвет, зазвучат по-иному. Возьмём для примера механику. Вы можете использовать поэму «О природе вещей» Лукреция (см. § 2) для обсуждения с точки зрения законов механики, например, таких строк:

...Воздуха тонкая сущность
Не в состояньи вещам одинаковых ставить препятствий,
Но уступает скорее имеющим большую тяжесть...
Должно поэтому всё, проносясь в пустоте без препятствий,
Равную скорость иметь, несмотря на различие в весе.

Вы можете сопоставить методы Ньютона и Декарта, поговорить о механической картине мира, когда весь мир уподоблялся сложному и точному часовому механизму (см. § 3 и диалог «О привычке мыслить механистически»). При желании Вы можете показать, что во втором законе Ньютона «скрыты» принцип причинности и принцип относительности (см. диалог «Об использовании понятия симметрии при обучении физике»). При повторении законов сохранения энергии и импульса Вы можете рассмотреть открытие нейтрона (см. § 10). Как видите, есть много возможностей модернизировать преподавание такого раздела, как «Механика».

Учитель. Понимаю. Объясняя интерференцию и дифракцию света, я буду рассказывать не о тонких плёнках, а о голографии.

Автор. Очень советую находить время, чтобы обсуждать с учащимися различные вопросы физико-философского характера. В чём специфика микрообъекта? Чем он отличается от объектов, с какими мы имеем дело в повседневной практике? (См. § 7 и 8, а также диалог «Что такое микрообъект».) Как развивались представления о времени и пространстве? (См. § 6 и диалог «О времени».) Как происходило развитие физики? (См. § 16 и диалоги «О научных революциях» и «О путях дальнейшего развития физики».) Как сменялись физические картины мира? В чём основные отличия современной естественнонаучной картины мира от прежних картин? (См. § 3, 4, 11.) И т. д.

Везде, где возможно, старайтесь «высветить» *диалектику*. Предварительно проиграйте с учащимися диалог «О диалектике и метафизике». Обращайте внимание учеников на то, что по мере нашего проникновения в глубь материи происходит стирание граней, обнаруживается диалектическое единство — времени и пространства, корпускулярного движения и волнового, вещества и поля. Почаще обращайтесь к *природным явлениям* (см., например, [124]). Физика природных явлений необычайно украсит школьный курс физики, сделает его интересным для учащихся. Но дело не только в этом. Рассматривая физику

природы, мы можем очень эффективно реализовывать идеи гуманитаризации и интеграции, решать как познавательные, так и воспитательные задачи. Очень жаль, что в нынешнем школьном курсе физики природные явления почти совсем не рассматриваются.

Учитель. Всё это прекрасно. Но где взять время (если не изменить программу)?

Автор. Смелее корректируйте программу, подстраивайте её под новые идеи. Кроме того, можно организовать *факультативы*. Мы разработали программы факультативов: «Физика в природе» (для VII класса), «Физика в природе» (для X класса школ с углублённым изучением физики), «Вероятность в играх и развлечениях» (для VI класса), «Вероятность в окружающем мире» (для VII или VIII класса), «Вероятность в физике» (для X класса школ с углублённым изучением физики). Выбирайте, пожалуйста. Наконец, есть внеурочные формы работы с учащимися — *диспуты, конференции*. Тематика их может быть очень интересной: «Научные революции», «Физика в системе культуры», «Экология глазами физика» и т. д.

Учитель. Всё, что Вы предлагаете, очень интересно, актуально, полезно. Но для этого нужны учителя с достаточно высоким уровнем знаний, с широким кругозором.

Автор. Вы совершенно правы. Кроме того, нужно, чтобы учитель имел свободу самостоятельно решать, творить, ошибаться, искать. Такая свобода учителям сейчас предоставлена. Что же касается кругозора, то тут каждый учитель должен не пожалеть усилий. Нужно учиться, развиваться, расширять кругозор.

Учитель. Учителям надо помочь.

Автор. А разве данная книга не есть попытка помочь?

Учитель. Хорошо бы иметь перед глазами пробные учебники или учебные пособия нового типа.

Автор. Надеюсь, со временем они появятся.

Учитель. В заключение хочу спросить: а как вообще Вы представляете структуру обучения физике в средней школе?

Автор. Мне кажется, что должны быть три ступени. На первой ступени (в V – VI классах) отдельного предмета «Физика» нет; здесь физические знания включены в интегративный предмет достаточно широкого профиля. Это может быть предмет «Окружающий мир». На второй ступени (в VII – IX классах) вводится предмет «Физика», построенный на основе идей гуманитаризации и интеграции, полезный для всех учащихся — независимо от их будущей профессии. Третья ступень соответствует X – XI классам. В одних школах этой ступени вообще не будет, в других физика на этой ступени будет очень специальной, ориентированной на специализацию школы, в третьих физика на данной ступени будет изучаться особенно глубоко, будет основным предметом.

Полагаю, что всё это соответствует тем прогрессивным идеям о перестройке школы, которые высказываются в настоящее время.

ФАНТАЗИЯ НА ЗАДАННУЮ ТЕМУ

Дойдя до конца книги, читатель может спросить: а где же конкретная структура школьного курса физики, реализующего все те красивые идеи, о которых шла речь? Честно скажем: хотелось бы уйти от ответа на этот вопрос. Замыслы автора выявляются в самом произведении, а не в предварительных программах. В данном случае ответом должен был бы стать экспериментальный учебник физики. Но его пока нет. А вопрос уже задан, он требует ответа. Что ж, попробуем поговорить о программе (структуре) будущего курса физики, но будем помнить, что разговор пойдёт о будущем и что поэтому необходима известная осторожность. Поостережёмся категорических утверждений, а просто попытаемся немного пофантазировать. Пусть это будет своеобразная фантазия на заданную тему.

Прежде всего заметим, что дальние подступы к физике осваиваются уже на начальной ступени — в I – IV классах. Это делается в рамках интегративного предмета «Окружающий мир». Представим себе такой расклад. Первый класс: окружающий мир — знакомый и незнакомый. Второй класс: окружающий мир — красивый и некрасивый. Третий класс: окружающий мир — изменчивый и постоянный. Четвёртый класс: окружающий мир — таинственный и познаваемый. С какой бы стороны мы ни предлагали детям взглянуть на окружающий их мир, мы везде ненавязчиво демонстрируем диалектику. Особое внимание обращаем на формирование представлений об изменении во времени, сохранении, симметрии, гармонии. Дети начинают работать с понятиями «время», «расстояние», «скорость», «сила», «температура», «магнит» и учатся пользоваться соответственно часами, метром, спидометром, динамометром, термометром, компасом.

Ближние подступы к физике осваиваются в интегративном предмете «Окружающий мир» в V и VI классах.

В «Окружающем мире — V» учащиеся сначала (в первой четверти) рассматривают Луну и звёздное небо, пользуются телескопом, постигают элементы наблюдательной астрономии, учатся ориентироваться в пространстве и во времени, знакомятся в общих чертах с эволюцией родной планеты, её биосферы. Затем (во второй четверти) они обращаются к «первоначалам вещей» — от четырёх «стихий» древних греков (воздуха, воды, земли, огня) переходят к химическим элементам (рассматривается около десятка элементов), а от них к представлениям об атомно-молекулярном строении вещества, которые используются для объяснения простейших химических реакций: $C+O_2 \to C+O_2$ и $2H_2+O_2 \to 2H_2O$. Здесь же проницательная догадка древних греков о четырёх «стихиях» трансформируется в обсуждение четырёх состояний вещества и даются начальные сведения о переходах вещества из одних состояний в другие. Соприкоснувшись в первой четверти с космосом, а во второй с микромиром, учащиеся переходят в третьей четверти к изучению того мира, который они непосредственно наблюдают вокруг себя. На сцену выходят вопросы неживого и живого вещества. Основной акцент делается, конечно, на живом веществе, и прежде всего на растениях (наша планета — это зелёная планета!); здесь уместно рассмотреть основы ботаники. Но живой мир невозможен без мира неживого; растениям необходимы воздух, вода, земля. И поэтому учащиеся знакомятся со свойствами воздуха и воды, с горными породами и почвами. Наконец, в четвёртой четверти разворачиваются картины того мира, который создал сам человек. Они даются в развитии (чтобы можно было представить, как постепенно человек «становился великаном»). Начинаем издалека, не торопясь; используем при этом простейшие механизмы и приборы в демонстрациях несложных физических опытов, продолжаем постепенно формировать физические понятия. К понятиям, появившимся на начальной ступени, добавляются новые понятия: «масса», «плотность», «энергия». Затем картина развития техники начинает преподноситься во всё более ускоряющемся темпе и, соответственно, более широкими мазками — с выходом, в конечном счёте, на современность.

Предмет «Окружающий мир — VI» имеет второе название: «Наша планета Земля».

Сначала с самых общих позиций рассматриваются солнечно-земные связи. Что мы знаем о Солнце? Как воздействует его излучение на Землю, на всё живое? Почему Солнце — одновременно и наш друг, и наш недруг? Какую роль играет земная атмосфера? Как можно представить себе магнитное поле? Какова роль магнитного поля Земли? Что нужно знать о тяготении? Чем интересны возобновляемые источники энергии? После обсуждения подобных вопросов переходим к географии, физике и химии трёх земных «сфер» (литосферы, гидросферы, атмосферы). Отдельно выделяем тему «Свет и звук в атмосфере и гидросфере» и тем самым знакомим учащихся с начальными сведениями по оптике и акустике. Во всех темах широко используем учебный эксперимент, формируя физические и химические понятия и представления, умение производить наблюдения и измерения. Существенно, что все отмеченные темы имеют не только самостоятельное значение; они являются своеобразной прелюдией к основной теме данного курса — теме биосферы. Последняя рассматривается здесь как открытая самоорганизующаяся система, отличающаяся большой устойчивостью. Раскрываем принципиально важную, решающую роль живого вещества на нашей планете, подводим учащихся к осознанию роли разума в управлении дальнейшим развитием биосферы, в превращении её в ноосферу. Но это всё пока в будущем, а сегодня наша планета в опасности; пока ещё человек выступает как фактор, который разрушает все земные «сферы». Необходимо раскрыть перед учащимися результаты действия этого разрушающего фактора, обратить их лицом к нашей тревожной действительности, к острым экологическим проблемам. Чтобы решить эти проблемы и спасти биосферу, человек должен, наконец, стать действительно Человеком разумным. А для этого нужны культура, нравственность, образованность. И, конечно, нужны физические познания.

Вот теперь мы готовы к изучению базовых естественных предметов, и в том числе физики. Интегративные курсы «Окружающий мир», будем надеяться, выполнили свои функции (пропедевтическую и мотивационную), и теперь можно начать систематическое изучение физики. Но будем помнить, что пока ещё речь идёт отнюдь не об углублённом изучении физики. Физика в VII – IX классах видится как предмет развивающий, вносящий важный вклад в развитие мышления и культуры, необходимый всем учащимся без исключения. А углублённое изучение физики состоится позднее — в X – XI классах — и не везде, а лишь в школах (классах) соответствующего профиля.

Итак, пофантазируем о новой физике — VII – IX — физике гуманизированной, экологизированной, сынтегрированной с астрономией, активно взаимодействующей со всеми естественными предметами.

VII класс. Начинаем с эволюции Вселенной, образования галактик. Пристальнее вглядываемся в историю нашей Галактики, рассматриваем эволюцию Солнечной системы, образование планет, возникновение и эволюцию жизни на одной из планет, возникновение разума, цивилизации. Ничтожно время жизни человека по сравнению со временем развития цивилизации, а последнее ничтожно по сравнению со временем эволюции Солнечной системы. Ты, сидящий сейчас за партой, — крошечная «частица» Космоса, существующая какое-то мгновение на космических часах, но именно ты в данный момент постигаешь разумом весь Космос, его развитие. Ты — Человек разумный, и этим ты велик!

Разумный человек издавна обращал взор к небу, звёздам. И мы тоже начнём с этого. Мы начнём с элементов небесной механики, познакомимся с движением планет, их спутников, комет. Какова траектория Луны с точки зрения земного наблюдателя и наблюдателя, оказавшегося вблизи Солнца? От небесной кинематики перейдём к рассмотрению взаимодействия тел, поучимся складывать силы. Свяжем массу с инертностью, а инертность с проявлением причинности, благодаря чему прошлое влияет на настоящее, а настоящее — на будущее. Обсудим роль тяготения во Вселенной, качественно рассмотрим закон всемирного тяготения. Познакомим учащихся с импульсом и объясним им сущность реактивного движения. Затем качественно рассмотрим первую и вторую космические скорости, вес и невесомость; совершим мысленно космические путешествия по маршрутам Земля — Луна — Земля, Земля — Марс — Земля. Побываем мысленно на Луне, на Марсе,

спутнике Юпитера. Завершим космическую главу темой «Исследования Земли из космоса».

Разумный человек всегда стремился проникнуть в суть вещей, хотел постичь их внутреннюю структуру. Мы уже знаем, что вещество состоит из атомов и молекул (из «Окружающего мира — V»). Теперь важно «прочувствовать» эту идею, понять, что же это такое — молекула и атом. Мы познакомимся с явлением диффузии, броуновским движением, рассмотрим качественно связь между давлением, объёмом и температурой газа. Как человек исследует строение вещества? Как он узнал химический состав далёких звёзд? Отталкиваясь от этих вопросов, познакомимся со спектральным анализом, а затем, рассматривая спектры атомов, придём к мысли о сложном строении атома. От строения атома можно перейти к атомному ядру и заглянуть (хотя бы с порога) в мир элементарных частиц.

Разумный человек с давних времён мечтал расширить свои возможности. Он мечтал плавать как рыба, летать как птица. Свои мечты он осуществил, покорив оба океана — и воздушный, и водный. Следуя этим путём, мы познакомим учащихся с действием жидкости на погружённое в неё тело, законом Паскаля, архимедовой силой. Мы отдадим должное людям, создавшим воздушный шар и дирижабль, акваланг и батискаф. Мы обратим внимание на крыло птицы, а затем рассмотрим внимательно крыло самолёта. Соприкоснёмся с аэро- и гидродинамикой, чтобы понять, как движутся тела в воздушных и водных потоках, как возникает удивительная подъёмная сила, благодаря которой многотонный лайнер, салон которого напоминает кинозал, легко взмывает ввысь. И одновременно мы покажем, во что обходится природе покорение человеком водной и воздушной стихий.

Великий дар природы — разум — человек всегда обращал на то, чтобы возвыситься над природой, покорить её. В древности, когда у него не было иных источников энергии, кроме мускулов, он расширил свои возможности, придумав рычаги и блоки. Впрочем, рычаги выдумывать не потребовалось — природа снабдила наш организм, наше тело множеством рычагов; очень поучительно повнимательнее рассмотреть их. Рычаги и блоки дают прекрасную возможность обсудить равновесие тел, введя понятие момента силы, сформировать представления о потенциальной и кинетической энергии, полезной работе, коэффициенте полезного действия механизмов. Используя рычаги, блоки, наклонную плоскость, человек соорудил в древние времена величественные храмы, воздвиг гигантские пирамиды. Но ему хотелось большего — быстро двигаться по суше и по воде, летать. Ему нужны были мощные источники энергии, мускулов было недостаточно. И появились паровые машины, на смену им пришли электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели. Развитие цивилизации шло одновременно с освоением новых источников энергии. И уже возник призрак энергетического голода — и было найдено оружие против него: атомная энергетика. И возник призрак экологической катастрофы. И потребовался пересмотр всех наших взглядов на энергетику — пересмотр под углом зрения выживания и дальнейшего развития цивилизации.

Вот такой могла бы быть физика в VII классе. Полагаем, что на примере этого класса читатель получил представление о нашем видении нового школьного курса физики. А что будет в VIII и IX классах? На этот счёт ограничимся здесь краткими тезисами.

VIII класс. *Вещество и тепловые явления*. Внутренняя энергия. Теплопередача. Работа и количество теплоты. Газовые законы. Жидкость. Фазовые переходы. Туман и облака. Гейзеры. Поверхностные явления. Капилляры. Кристаллы, их свойства. Извержение вулкана. Первое начало термодинамики. Второе начало термодинамики и направленность процессов энергообмена. Энергия и энтропия. Идеальная тепловая машина.

Электрические явления и поле. Взаимодействие неподвижных зарядов; электростатическое поле. Электроёмкость. Статическое электричество. Электрический ток; закон Ома. Простейшие электрические цепи. Проводники, диэлектрики, полупроводники. Электричество у нас дома. Электричество в атмосфере и живых организмах. Молния. Магнитное поле прямого и кругового тока. Электромагниты. Проводник с током в магнитном поле. Электродвигатель. Электромагнитная индукция. Генератор. Трансформатор.

Световые явления. Источники света. Испускание света атомами. Люминесценция. Лазер. Световой луч в однородной и неоднородной средах. Миражи. Отражение и преломление света. Полное отражение. Световые волокна. Зеркала, призмы, линзы. Человеческий глаз. Оптические приборы. Спектр. Радуга и гало.

IX класс. Первое полугодие — классическая физика.

Основы кинематики и динамики. Равноускоренное прямолинейное движение и движение по окружности. Законы Ньютона. Силы в природе. Сила тяжести, сила упругости, силы трения. Автомобиль на скользкой дороге. Равновесие сил.

Законы сохранения. Работа и энергия. Сохранение и превращение энергии. Сохранение импульса. Реактивное движение. Сохранение момента импульса. Гироскоп. Симметрия законов природы относительно пространственно-временных преобразований.

Колебания и волны. Колебательное движение, маятник. Резонанс. Распространение колебаний в среде. Волны. Сейсмические волны. Волны на поверхности воды. Интерференция и дифракция.

Колебательный контур. Излучение электромагнитных волн. Электромагнитное поле и электромагнитные волны. Принцип радиосвязи. Элементы радиотехники. Радиолокация и телевидение. Природа света. Оптическая голография.

Второе полугодие — современная физика.

Вероятность в физике. Необходимое и случайное в вероятностных закономерностях. Вероятностное объяснение второго начала термодинамики и энтропии. Возрастание беспорядка в закрытых системах. Самоорганизация в открытых системах. Синергетика.

Элементы квантовой физики. Квантование энергии. Квантовые переходы. Микрообъект в интерферометре (вероятностный подход). Соотношения неопределённостей. Современная модель атома, электронные облака. Образование химических связей. Объект и наблюдатель. Принципы соответствия и дополнительности.

Современная естественнонаучная картина мира. Механическая и электромагнитная картины мира. Три этапа в познании строения вещества (атом, атомное ядро, кварковая структура частиц). Основные взаимодействия. Энергия связи нуклонов в ядре атома. Деление тяжёлых ядер; ядерный реактор. Термоядерные реакции.

Поле и вещество в современной картине мира. Взаимопревращения частиц. Физический вакуум. Элементы современной космологии. Расширяющаяся Вселенная. Современный этап развития познания и идея интеграции в науке. Может ли физика завершиться?

Возможно, читателю данная программа покажется перегруженной. Думаем, что эти опасения преждевременны. Здесь указаны лишь идеи. Всё будет зависеть от глубины проработки этих идей. Но одно усложнение (усложнение ли?) всё же просматривается — широкое использование вероятностей в курсе физики в IX классе. Оно предполагает предварительное обучение учащихся вероятностям. Это усложнение принципиально важно.

Каждый волен продумать и предложить собственное видение нового школьного курса физики. Мы изложили нашу альтернативу. И надеемся, что наши фантазии найдут у читателя позитивный отклик и помогут ему решиться на давно назревшую радикальную перестройку преподавания физики в школе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркс К., Энгельс Ф. Соч. — 2-е изд. — Т. 2.
2. Маркс К., Энгельс Ф. Соч. — 2-е изд. — Т. 20.
3. Маркс К., Энгельс Ф. Соч. — 2-е изд. — Т. 21.
4. Ленин В. И. Полн. собр. соч. — Т. 18.
5. Ленин В. И. Поли. собр. соч. — Т. 29.
6. Ампер А. Электродинамика./ Пер. с франц. — М.: ИЛ, 1954.
7. Аристотель. Соч. — М.: Мысль, 1976. — Т. 1.
8. Арнольд В. И. Теория катастроф. — М.: Знание, 1981.
9. Блохинцев Д. И. Принципиальные вопросы квантовой механики. — М.: Наука, 1966.
10. Блэкуэлл Дж. Законы движения Декарта./ Пер. с англ. // Физика на рубеже XVII – XVIII вв. Сб.ст. — М.: Наука, 1974.
11. Бор Н. Избр. научн. труды. — М.: Наука, 1970. — Т. 1.
12. Бор Н. Избр. научн. труды. — М.: Наука, 1971. — Т. 2.
13. Борн М. Физика в жизни моего поколения./ Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1963.
14. Бугаев А. И. Методика преподавания физики в средней школе. — М.: Просвещение, 1981.
15. Вавилов С. И. Ленин и физика. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
16. Вайнберг С. Первые три минуты: современный взгляд на происхождение Вселенной./ Пер. с англ. — М.: Энергоиздат, 1981.
17. Вайскопф В. Связь между физикой и другими науками // УФН. — 1968. — Т. 95. — Вып. 2.
18. Вайскопф В. Физика в XX веке // УФН. — 1970. — Т. 101. — Вып. 4.
19. Вейль Г. Симметрия./ Пер. с англ. — М.: Наука, 1968.
20. Вернадский В. И. Избр. труды по истории науки. — М.: Наука, 1981.
21. Вигнер Ю. Этюды о симметрии./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1971.
22. Волковыский Р. Ю. Об изучении основных принципов физики. — М.: Просвещение, 1982.
23. Воронов Г. С. Такая замечательная Вселенная // Химия и жизнь. — 1984. — № 1.
24. Гайденко П. П. Эволюция понятия науки: становление и развитие первых научных программ. — М.: Наука, 1980.
25. Гайденко П. П. Эволюция понятия науки: формирование научных программ нового времени. — М.: Наука, 1987.
26. Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Хаотическая динамика простых систем // Природа. — 1981. — № 2.
27. Гарднер М. Теория относительности для миллионов./ Пер. с англ. — М.: Атомиздат, 1965.
28. Гарднер М. Этот правый, левый мир./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1967.
29. Гегель Г. Собр. соч.: В 14 т. — Т. 9.
30. Гейзенберг В. Физические принципы квантовой теории./ Пер. с нем. — М.; Л.: ГТТИ, 1932.
31. Гейзенберг В. Открытие Планка и основные философские проблемы атомной теории // УФН. — 1958. — Т. 66. — Вып. 2.
32. Гейзенберг В. Шаги за горизонт./ Пер. с нем. — М.: Прогресс, 1987.
33. Гельфер Я. М. Законы сохранения. — М.: Наука, 1967.
34. Герцен А. И. Соч. — М.: Правда, 1975. — Т. 2.
35. Глазунов А. Т. Техника в курсе физики средней школы. — М.: Просвещение, 1977.
36. Глеман М., Варга Т. Вероятность в играх и развлечениях./ Пер. с франц. — М.: Просвещение, 1979.
37. Голин Г. М. Физики о преподавании физики. — М.: Знание, 1979.

38. Голин Г. М. Вопросы методологии физики в курсе средней школы. — М.: Просвещение, 1987.
39. Готт В. С. Философские вопросы современной физики. — М.: Высшая школа, 1967.
40. Гоффман Б. Корни теории относительности./ Пер. с англ. — М.: Знание, 1987.
41. Декарт Р. Избр. произв./ Пер. с франц. — М: ИЛ, 1950.
42. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики./ Пер. с англ. — М.: Наука, 1985.
43. Дик Ю. И., Тарасов Л. В. Практические аспекты гуманитаризации преподавания физики в школе// Физика в школе. — 1988. — № 2.
44. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. — М.: Радио и связь, 1982.
45. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики: с начала XIX до середины XX в. — М.: Наука, 1979.
46. Дынник М. А. Материалисты Древней Греции // Собрание текстов Гераклита, Демокрита и Эпикура. — М.: Политиздат, 1955.
47. Ефименко В. Ф. Методологические вопросы школьного курса физики. — М.: Педагогика, 1976.
48. Зельдович Я. Б. Современная космология // Природа. — 1983. — № 9.
49. Ильченко В. Р. Перекрестки физики, химии и биологии. — М.: Просвещение, 1986.
50. Кадомцев Б. Б., Рязанов А. И. Что такое синергетика? // Природа. — 1983. — № 8.
51. Каменецкий С. Е., Солодухин Н. А. Модели и аналогии в курсе физики средней школы. — М.: Просвещение, 1982.
52. Карцев В. П. Максвелл. — М.: Наука, 1974.
53. Кедров Б. М. О научных революциях // Наука и жизнь. — 1975. — № 10.
54. Кедров Б. М. О закономерностях научно-технической революции // Природа. — 1977. — № 12.
55. Комаров В. Физика и культура // Знание — сила. — 1987. — № 6.
56. Кондильяк Э. Соч. — М.: Наука, 1982. — Т. 2.
57. Краткий словарь по философии / Под ред. И. В. Блауберга, И. К. Пантина. — М.: Политиздат, 1982.
58. Крылов А. Н. Ньютон и его значение в мировой науке // Исаак Ньютон. Сб. / Под ред. С. И. Вавилова. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1943.
59. Кудрявцев П. С. Курс истории физики. — М.: Просвещение, 1982.
60. Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и теория саморегуляции: идеи, методы, перспективы. — М.: Знание, 1983.
61. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика: нерелятивистская теория. — М.: Наука, 1974.
62. Ланина И. Я. Формирование познавательных интересов учащихся на уроках физики. — М.: Просвещение, 1985.
63. Лаплас П. С. Изложение системы мира. — Л.: Наука, 1982.
64. Ленинское философское наследие и современная физика / Под ред. Э. М. Чудинова. — М.: Наука, 1981.
65. Ленц Э. Х. Избр. труды. — М.: Изд-во АН СССР, 1950.
66. Летохов В. С, Устинов Н. Д. Мощные лазеры и их применение. — М.: Советское радио, 1980.
67. Ломоносов М. В. Полн. собр. соч. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1954. — Т. 3.
68. Лукреций. О природе вещей / Ред. лат. текста и перевод Ф. А. Петровского. — М.: Изд-во АН СССР, 1946.
69. Лурье С. Я. Демокрит. — М.: Наука, 1970.
70. Лыков В. Я. Эстетическое воспитание при обучении физике. — М.: Просвещение, 1986.
71. Льоцци М. История физики./ Пер. с итал. — М.: Мир, 1970.

72. Лэмб У. Измерения в квантовомеханических системах и интерпретация нерелятивистской квантовой механики // УФН. — 1969. — Т. 99. — Вып. 4.
73. Мигдал А. Б. Поиски истины. — М.: Молодая гвардия, 1983.
74. Моисеев Н. Н. Экология человечества глазами математика. — М.: Молодая гвардия, 1988.
75. Моисеев Н. Н. В. И. Вернадский и естественнонаучная традиция // Коммунист. — 1988. — № 2.
76. Мороз О. П. В поисках гармонии. — М.: Атомиздат, 1978.
77. Морозов Л. Л. Поможет ли физика понять, как возникла жизнь? // Природа. — 1984. — № 12.
78. Мощанский В. Н. Формирование мировоззрения учащихся при изучении физики. — М.: Просвещение, 1989.
79. Мощанский В. Н., Савелова Е. В. История физики в средней школе. М.: Просвещение, 1981.
80. Мултановский В. В. Физические взаимодействия и картина мира в школьном курсе — М.: Просвещение, 1977.
81. Мякишев Г. Я. Динамические и статистические закономерности в физике. — М.: Наука, 1973.
82. Мякишев Г. Я. Элементарные частицы. — М.: Наука, 1979.
83. Мякишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика: Учебник для 11 класса средней школы. — М.: Просвещение, 1989.
84. На пути к единой теории поля: Сб. переводных статей. — М.: Знание, 1980 (Серия «Физика». — № 11).
85. Нейтрон: предыстория, открытие, последствия / Под ред. Б. М. Кедрова. — М.: Наука, 1975.
86. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1979.
87. Ньютон И. Математические начала натуральной философии // Крылов А. Н. Собр. трудов, — М.; Л., 1936. — Т. 7.
88. Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц. — М.: Наука, 1984.
89. Окунь Л. Б. α, β, γ, … z: — элементарное введение в физику элементарных частиц. — М.: Наука, 1985.
90. Ораевский В. Н. Ядерная энергетика. — Киев: Наукова думка, 1978.
91. Основы методики преподавания физики в средней школе / Под ред. А. В. Пёрышкина, В. Г. Разумовского, В. А. Фабриканта. — М.: Просвещение, 1984.
92. Островский Ю. И. Голография и её применение. — Л.: Наука, 1973.
93. Пекара А. Новый облик оптики./ Пер. с польск. — М.: Советское радио, 1973.
94. Планк М. Избр. труды. — М.: Наука, 1975.
95. Планк М. От относительности к абсолютизму./ Пер. с нем. — Вологда, 1925.
96. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса./ Пер. с англ. — М.: Прогресс, 1986.
97. Принцип симметрии: историко-методологические проблемы / Под ред. Б. М. Кедрова, Н. Ф. Овчинникова. — М.: Наука, 1978.
98. Принцип соответствия: историко-методологический анализ / Под ред. Б. М. Кедрова, Н. Ф. Овчинникова. — М.: Наука, 1979.
99. Проблемы причинности в современной физике. — М.: Изд-во АН СССР, 1960.
100. Пуанкаре А. О науке./ Пер. с франц. — М.: Наука, 1983.
101. Пуанкаре А. // Bull. Sci. Math. — 1904. — V. 28. — Ser. 2.
102. Разумовский В. Г. Развитие творческих способностей учащихся в процессе обучения физике. — М.: Просвещение, 1975.
103. Разумовский В. Г., Тарасов Л. В. Развитие общего образования: интеграция и гуманитаризация // Советская педагогика. — 1988. — № 7.
104. Растригин Л. А. Этот случайный, случайный, случайный мир. — М.: Молодая гвар-

дия, 1974.
105. Реньи А. Трилогия о математике./ Пер. с венг. — М.: Мир, 1980.
106. Рожанский И. Д. Проблема движения и развития в учении Анаксагора // УФН. — 1968. — Т. 95. — Вып. 2.
107. Рожанский И. Д. Античная наука. — М.: Наука, 1980.
108. Семыкин Н. П., Любичанковский В. А. Методологические вопросы в курсе физики средней школы. — М.: Просвещение, 1979.
109. Симпсон Дж. Новое небо, новая Земля, новый человек // Природа. — 1979. — № 5.
110. Синай Я. Г. Случайность неслучайного//Природа. — 1981. — № 3.
111. Совершенствование содержания обучения физике в средней школе / Под ред. В. Г. Зубова, В. Г. Разумовского, Л. С. Хижняковой. — М.: Педагогика, 1978.
112. Современный урок физики в средней школе / Под ред. В. Г. Разумовского, Л. С. Хижняковой. — М.: Просвещение, 1983.
113. Спиноза Б. Избр. произв. — М., 1957. — Т. 1.
114. Спасский Б. И. Физика в её развитии. — М.: Просвещение, 1979.
115. Тарасов Л. В. Физические основы квантовой электроники. — М.: Советское радио, 1976.
116. Тарасов Л. В. Оптика, рождённая лазером. — М.: Просвещение, 1977.
117. Тарасов Л. В. Основы квантовой механики. — М.: Высшая школа, 1978.
118. Тарасов Л. В. Симметрия в задачах по физике // Квант. — 1978. — № 6.
119. Тарасов Л. В. Этот удивительно симметричный мир. — М.: Просвещение, 1982.
120. Тарасов Л. В. Мир, построенный на вероятности. — М.: Просвещение, 1984.
121. Тарасов Л. В. Лазеры: действительность и надежды. — М.: Наука, 1985.
122. Тарасов Л. В. Волны и вероятность в квантовой механике: Сб. научно-методических статей по физике. — М.: Высшая школа, 1987.
123. Тарасов Л. В. Введение в квантовую оптику. — М.: Высшая школа, 1988.
124. Тарасов Л. В. Физика в природе. — М.: Просвещение, 1988.
125. Тарасов Л. В. Гуманитаризация как одно из основных направлений перестройки преподавания физики в школе // Физика в школе. — 1988. — № 2.
126. Тарасов Л. В. Возможности совершенствования языка и стиля школьных учебников по физике, химии и биологии // Проблемы школьного учебника. Сб. — М.: Просвещение. — 1988. — № 18.
127. Учебник физики: каким ему быть? // Физика в школе. — 1987. — № 3.
128. Фабрикант В. А. О современном курсе физики в средней школе // Советская педагогика. — 1968. — № 6.
129. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству./ Пер. с англ. — М., 1947. — Т. 1.
130. Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству./ Пер. с англ. — М., 1950. — Т. 3.
131. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1965. — Т. 4.
132. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1965. — Т. 8.
133. Фейнман Р., Хиббс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1968.
134. Фейнман Р. Характер физических законов./ Пер. с англ. — М.: Наука, 1987.
135. Фок В. А. Начала квантовой механики. — М.: Наука, 1976.
136. Фок В. А. Об интерпретации квантовой механики // Философские вопросы современной физики. — М.: Изд-во АН СССР, 1959.
137. Форд К. Мир элементарных частиц./ Пер. с англ. — М.: Мир, 1965.
138. Франкфурт У. И., Френк А. М. У истоков квантовой теории. — М.: Наука, 1975.
139. Франсон М. Голография./ Пер. с франц. — М.: Мир, 1972.

140. Хакен Г. Синергетика./ Пер. с нем. — М.: Мир, 1980.
141. Чернин А. Д. Физика времени. — М.: Наука, 1987.
142. Шрёдингер Э. Избр. труды по квантовой механике. — М.: Наука, 1976.
143. Эйнштейн А. Собр. научн. трудов. — М.: Наука, 1965. — Т. 1.
144. Эйнштейн А. Собр. научн. трудов. — М.: Наука, 1966. — Т. 3.
145. Эйнштейн А. Собр. научн. трудов. — М.: Наука, 1967. — Т. 4.
146. Яворский Б. М. Основные вопросы современного школьного курса физики. — М.: Педагогика, 1976.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава третья. Методологические вопросы современной физики

Учебное издание

Тарасов Лев Васильевич

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Зав. редакцией **В. А. Обменина**
Редактор **В. А. Обменина**
Младший редактор **О. В. Агапова**
Художник **С. Ф. Лухин**
Художественный редактор **В. М. Прокофьев**
Технические редакторы **Л. П. Бирюкова, С. С. Якушкина**
Корректоры **Т. А. Воробьёва, Е. Г. Чернышова**

ИБ № 11412

Сдано в набор 15.12.89. Подписано к печати 06.08.90. Формат 60 × 90 $^{1}/_{16}$. Бум. офс. № 2. Гарнитура литературная. Печать офсет. Усл. печ. л. 18,0 + 0,25 форз. Усл. кр.-отт. 36,5. Уч.-изд. л. 20,93 + 0,42 форз. Тираж 127 400 экз. Заказ № 2367. Цена 1 р. 40 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Министерства печати и массовой информации РСФСР. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Набрано на Саратовском ордена Трудового Красного Знамени полиграфическом комбинате Министерства печати и массовой информации РСФСР. 410004, Саратов, ул. Чернышевского, 59.

Отпечатано на Смоленском полиграфкомбинате Министерства печати и массовой информации РСФСР. 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.

